

## Investigações geotécnicas em taludes rochosos: o caso da escarpa de S. Cristóvão (Cinfães)

SARA CASTRO DUARTE  
Julho de 2017



**Instituto Superior de Engenharia do Porto**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

## **Investigações geotécnicas em taludes rochosos: o caso da escarpa de S. Cristóvão (Cinfães)**

**Sara Castro Duarte**



**2017**



(página propositadamente em branco)



**Instituto Superior de Engenharia do Porto**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

## **Investigações geotécnicas em taludes rochosos: o caso da escarpa de S. Cristóvão (Cinfães)**

**Sara Castro Duarte**

**1121241**

*Projecto apresentado ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Geotécnica e Geoambiente**, realizada sob a orientação do Professor Helder I. Chaminé, Professor Coordenador com Agregação do Departamento de Engenharia Geotécnica do ISEP.*

(página propositadamente em branco)

## **Júri**

### **Presidente**

Doutor Helder Gil Iglésias de Oliveira Chaminé

*Professor Coordenador com Agregação, Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto*

Doutor João Paulo Meixedo dos Santos Silva

*Professor Adjunto, Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto*

Doutora Maria José Coxito Afonso

*Professora Adjunta, Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto*

Mestre e Especialista José Filinto Castro Trigo

*Professor Adjunto, Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia do Porto*

Mestre Cláudio Manuel Morgado da Santa

*Direção de Geologia e Instrumentação, EPOS – Empresa Portuguesa de Obras Subterrâneas, SA, Oeiras*

---

*A dissertação de **mestrado em engenharia geotécnica e geoambiente** (MEGG) foi apresentada e defendida em prova pública, pela Licenciada **Sara Castro Duarte**, no Auditório de Geotecnia do Departamento de Engenharia Geotécnica (ISEP) em 27 de Julho de 2017 mediante o júri nomeado, em que foi atribuída, por unanimidade, a classificação final de **18 (dezoito) valores**, cuja fundamentação se encontra em acta. Todas as correções pontuais determinadas pelo júri, e só essas, foram efectuadas.*

---

*Dedico esta dissertação:*

*Às estrelinhas que tenho no céu, Carolina e António.*

(página propositadamente em branco)

## Agradecimentos

Antes de começar a expor todo o meu trabalho tenho de salientar que contactei com várias pessoas que estiveram presentes nesta etapa da minha vida pessoal e académica para me apoiar e incentivar, enquanto que dentro de mim corria um sangue que transbordava pressão e nervosismo para que esta dissertação tivesse o fim que sempre desejei. Sendo assim, não posso deixar de agradecer às seguintes personalidades, a saber:

Ao meu orientador Professor Helder I. Chaminé (DEG e LABCARGA|ISEP), pelo apoio incondicional, tanto na discussão e na minuciosa revisão da dissertação, como durante as saídas de campo e em todo o acompanhamento prestado. Também devo agradecer toda a confiança que depositou em mim e por todo o incentivo e os ensinamentos prestados durante todo o meu percurso académico;

Ao Sr. Engenheiro José Filinto Trigo (DEC e NEC|ISEP), por toda a ajuda nas primeiras fases do trabalho de campo, bem como na discussão dos tópicos relacionados com a modelação geotécnica e solução de suporte;

À empresa Golder Associates Portugal Unipessoal Lda, na pessoa do Sr. Eng.º Ricardo Bahia, pela autorização na utilização de alguns dados geológico-geomecânicos do pormenorizado estudo geotécnico desenvolvido, em que a signatária participou através do consórcio de serviços especializados LABCARGA & NEC do ISEP;

Gratos à Câmara Municipal de Cinfães, especialmente ao Sr. Eng.º Luís Sequeira, por todo o apoio e partilha de elementos cartográficos e geológico-geotécnicos de base;

Um obrigado aos centros de prestação de serviços especializados do ISEP (Núcleo de Estudos da Construção – NEC e Laboratório de Cartografia e Geologia Aplicada – LABCARGA) por todo o apoio e facilidades na utilização dos laboratórios e equipamentos, sem o qual não era possível realizar este trabalho;

À amiga e Dr.ª Liliana Freitas (LABCARGA|ISEP) pela colaboração prestada durante o intenso trabalho de campo, nas imagens vetoriais, todo o material tratado em SIG e também, pela enorme simpatia, boa disposição e companheirismo;

Ao Doutor José Teixeira (LABCARGA|ISEP e FLUP) por todo o auxílio precioso prestado nos assuntos relacionados com o SIG. É de salientar que o seu espírito cordial e divertido foi muito agradável durante todo o percurso da realização deste trabalho;

Aos meus amigos e colegas Ana Mendes, Mariana Soares e Humberto Oliveira pelo importante apoio prestado nos levantamentos cartográficos de campo da escarpa de S. Cristóvão;

Ao meu colega Eng.º Pedro Ferraz (NEC|ISEP) por toda a cooperação e disponibilidade de entreaajuda na fase final da minha dissertação, aquando a realização das modelações geotécnicas com programas de cálculo automático;

Um agradecimento fulcral é dirigido a todos os professores e colegas que me acompanharam durante os últimos 5 anos, pois todos eles conseguiram acrescentar algo ao meu percurso e vivência, desde as aulas aos tempos livres passados juntos. Tenho que salientar que tive o privilégio de estar em contacto com pessoas fantásticas e com um espírito de entreaajuda imenso;

Aos meus amigos e à minha família tenho um enorme obrigado a pronunciar. Todos compreenderam as minhas mudanças de humor, ajudaram-me a ultrapassar todos os obstáculos que a vida me colocou, incentivaram-me nas alturas de maior exigência e responsabilidade e, bem assim, proporcionaram-me os melhores momentos da minha vida;

Aos meus Pais devo um especial obrigada por todos os esforços que fizeram para eu conseguir chegar onde cheguei e por ser quem sou. Todo o meu esforço e dedicação devo- o a eles;

Por último, a uma pessoa importante, que acreditou sempre em mim, mesmo quando eu não sabia do que era capaz, que esteve e está sempre presente nos bons e maus momentos e que sempre me deu uma força imensa quando as coisas pareciam desmoronar.

A todos, sem exceção, o meu *Muito Obrigado!*





## **Palavras-chave**

Maciços rochosos, geomecânica, geotecnia de taludes, queda de blocos, modelação geotécnica, Cinfães.

## **Resumo**

Este trabalho tem como objetivo demonstrar a importância das investigações geológicas, geotécnicas e geomecânicas em taludes rochosos, mais concretamente na escarpa rochosa de S. Cristóvão (Cinfães, NW de Portugal), adjacente a uma via de comunicação. Na primeira parte do estudo, realizou-se a caracterização da área em questão, a nível cartográfico, geológico, geomorfológico e hidrológico, numa segunda parte, procedeu-se a estudos de geotecnia e geomecânica de taludes. Com recurso à técnica de amostragem linear recolheu-se toda a informação geológica, geotécnica e geomecânica da escarpa e, para além disso, avaliou-se o índice de resistência à compressão uniaxial do material-rocha e das superfícies das descontinuidades. Posteriormente foi compilada e cruzada toda a informação para o estudo da compartimentação do maciço rochoso e estabelecimento de uma cartografia de zonamento geotécnico. Na classificação do maciço rochoso, em termos de qualidade, recorreu-se às classificações geomecânicas aplicadas a taludes (*e.g.*, RMR, SMR, GSI). A classificação SMR permitiu avaliar a estabilidade da escarpa e os potenciais mecanismos de rotura juntamente com a avaliação geológico estrutural através do teste *de Markland*. De forma a avaliar a suscetibilidade e o nível de perigosidade da escarpa aplicou-se o sistema RHRSm2 e o índice de qualidade de taludes (SQI). De forma expedita, aplicando programas numéricos (*Swedge* e *Rocfall* da *RocScience*), realizou-se a modelação das possíveis cunhas e as respetivas potenciais trajetórias. Por último é apresentada a solução de reforço e de proteção proposta, bem como a comparação com a solução recentemente implementada.

(página propositadamente em branco)

**Keywords**

Rock Masses, geomechanics, slope geotechnics, rock fall, geotechnics modelling, Cinfães.

**Abstract**

This work aims to demonstrate the importance of geological, geotechnical and geomechanical investigations in rock slopes, more specially in the rocky scarp of S. Cristóvão (Cinfães, NW Portugal), adjacent to a roadway. In the first part of the study, the characterization of the site was carried out, at the cartographic, geological, geomorphological and hydrological level, in a second part, slope geotechnical and geomechanical studies were carried out. Using the scanline sampling technique, geological, geotechnical and geomechanical information of the scarp was collected and, in addition, the uniaxial compressive strength index of the rock material and the discontinuity surfaces were evaluated. Afterwards, all information was compiled and cross-checked for the study of the block size of the rock mass and the establishment of a geotechnical zoning map. The classification of the rock mass in terms of quality was based on the geomechanical classifications applied to slopes (*e.g.*, RMR, SMR, GSI). The SMR classification permitted to evaluate the stability of the scarp and the potential mechanisms of rupture together with the structural geological evaluation through the Markland test. In order to evaluate the susceptibility and the level of danger of the slope, the RHRS<sub>m2</sub> system and slope quality index (SQI) were applied. In a prompt approach was applied numerical programs (Swedge and Rocfall from RocScience) to the modelling of possible wedges and their potential trajectories. Finally, is presented the reinforcement and protection solution designed, as well as the comparison with the recently implemented solution.

(página propositadamente em branco)

---

## ÍNDICE

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1.INTRODUÇÃO GERAL.....</b>  | <b>1</b>  |
| 1.1.Enquadramento Geral.....  | 3         |
| 1.2.Breve contextualização do caso de estudo.....   | 5         |
| 1.3.Objetivos .....   | 7         |
| 1.4.Organização do projeto.....   | 8         |
| 1.5.Metodologias e técnicas .....   | 9         |
| <b>2.GEOMECÂNICA E GEOTECNIA DE TALUDES ROCHOSOS .....</b>  | <b>17</b> |
| 2.1.Generalidades .....   | 19        |
| 2.2.Compartimentação dos maciços rochosos .....   | 21        |
| 2.1.1.Reconhecimento geológico .....  | 21        |
| 2.1.2.Cartografia geotécnica.....   | 21        |
| 2.1.3.Parâmetros dos maciços rochosos .....   | 22        |
| 2.1.4.Parâmetros geológicos – geotécnicos das discontinuidades.....   | 27        |
| 2.2.Estabilidade de taludes: noções básicas, tipos e análise .....  | 31        |
| 2.3.Classificações geomecânicas.....  | 36        |
| 2.3.1.Considerações iniciais.....   | 36        |
| 2.3.2.RMR – “Rock Mass Rating” .....  | 37        |
| 2.3.3.SMR – “Slope Mass Rating” .....   | 42        |
| 2.3.4.GSI – “Geological Strength Index” .....   | 45        |
| 2.4.Sistemas de classificação de maciços rochosos e nível de perigosidade geotécnica.....                   | 50        |
| 2.4.1.Considerações iniciais.....   | 50        |
| 2.4.2.Rockfall Hazard Rating System (RHRSm2) .....  | 51        |
| 2.4.3.Slope Quality Index (SQI) .....   | 54        |
| 2.5.Avaliação da estabilidade de taludes rochosos .....   | 58        |
| 2.5.1.Teste de Markland.....  | 58        |
| 2.5.2.Modelação geotécnica: RocFall e Swedge.....   | 60        |
| <b>3.CASO DE ESTUDO: INVESTIGAÇÕES GEOTÉCNICAS E GEOMECÂNICAS DA ESCARPA DE S. CRISTÓVÃO (CINFÃES).....</b> | <b>63</b> |
| 3.1.Descrição da área de S. Cristóvão de Nogueira .....   | 65        |
| 3.2.Enquadramento regional: geográfico, geológico e geomorfológico.....                                     | 66        |
| 3.2.1.Enquadramento geográfico .....  | 66        |
| 3.2.2.Enquadramento geológico .....   | 68        |

|  |            |
|--|------------|
| 3.2.3.Enquadramento geomorfológico .....   | 71         |
| 3.3.Hidroclimatologia .....  | 72         |
| 3.4.Ocupação do solo e breves condicionantes de ordenamento .....                              | 74         |
| 3.5.Caracterização do talude e condições geológicas e geotécnicas.....                         | 76         |
| 3.5.1.Generalidades .....  | 76         |
| 3.5.2.Estudos geológico–geotécnicos .....  | 77         |
| 3.5.3.Zonamento geotécnico .....   | 77         |
| 3.5.4.Cartografia do zonamento geotécnico.....   | 90         |
| 3.5.5.Definição da blocometria geral .....   | 91         |
| 3.6.Classificações geomecânicas .....  | 92         |
| 3.6.1.Geomecânica dos maciços rochosos.....  | 92         |
| 3.6.2.Parâmetros geomecânicos adotados .....   | 93         |
| 3.6.3.Cartografia do zonamento geomecânico .....   | 94         |
| 3.7.Definição do modelo tridimensional da Escarpa de S. Cristóvão .....                        | 95         |
| 3.8.Análise de estabilidade geoestrutural .....  | 97         |
| 3.8.1.Teste de Markland.....   | 97         |
| 3.8.2.Modelação geotécnica de estabilidade de cunhas (Swedge) e queda de blocos (RocFall)..... | 100        |
| 3.8.2.1.Estabilidade de cunhas – Swedge .....  | 100        |
| 3.8.2.2.Queda de blocos - RocFall.....   | 106        |
| 3.8.3.Análise de suscetibilidade e nível de perigosidade de taludes rochosos .....             | 109        |
| 3.8.4.Proposta de solução final .....  | 112        |
| 3.8.4.1.Elementos instabilizadores .....   | 112        |
| 3.8.4.2.Soluções de proteção e estabilização .....   | 113        |
| <b>4.CONCLUSÕES.....</b>   | <b>119</b> |
| 4.1.Considerações finais .....   | 121        |
| 4.2.Perspetivas futuras .....  | 126        |
| <b>5.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>  | <b>127</b> |
| <b>6.ANEXOS.....</b>   | <b>135</b> |

## ÍNDICE DE ANEXOS

**ANEXO I** – Extrato da ficha de inspeção geral da Escarpa Rochosa de S. Cristóvão.

**ANEXO II** – Extrato da ficha de inspeção geral de cada zona geotécnica da Escarpa Rochosa de S. Cristóvão.

**ANEXO III** – Aplicação nas diversas zonas geotécnicas dos índices SQI e RHRSm2.

---

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 1</b> - A), B) Imagens do incêndio de julho de 2015 que atingiu o talude do lugar do Lavadouro, S. Cristóvão – Fotos Eng.º L. Sequeira (CMC); C) Fotografia de um bloco rochoso que atingiu a estrada municipal entre a Barragem do Carrapatelo e o lugar de Casal, no mês de julho de 2015 – Foto Eng.º L. Sequeira (CMC); D), E), F) Aspeto dos estragos causados no pavimento da estrada; G) Exemplo de instabilidade de blocos de dimensões apreciáveis do maciço – Foto Eng.º J.F. Trigo (fevereiro de 2016). .... | 6  |
| <b>Figura 2</b> - Abordagem metodológica integradora para o estudo da escarpa rochosa de S. Cristóvão (Cinfães). ....   | 9  |
| <b>Figura 3</b> - Enquadramento cartográfico da área de S. Cristóvão (Cinfães). ....  | 10 |
| <b>Figura 4</b> - Aspetos ilustrativos da aplicação da técnica de amostragem linear [A) e B) cartografia geológico-geotécnica de superfícies expostas através da técnica das “scanlines” na escarpa de S. Cristóvão (Cinfães)]. ....  | 11 |
| <b>Figura 5</b> - Aspetos da monitorização com o VANT, na escarpa rochosa de S. Cristóvão: A) Levantamento de ponto de controlo por GPS para georreferenciação das imagens; B) VANT em operação. ....   | 14 |
| <b>Figura 6</b> - Aspetos da modelação tridimensional, com recurso às fotografias do VANT: A, B) vista de SW e NW da escarpa rochosa; C, D) construção de perfis transversais a partir do modelo tridimensional. ....   | 15 |
| <b>Figura 7</b> - A) Exemplo da utilização do GPS de alta precisão Trimble ® GeoExplorer na georreferenciação de pontos de controlo para a georreferenciação de imagens; B) Georreferenciação de pontos de controlo para o levantamento VANT. ....  | 16 |
| <b>Figura 8</b> - Resumo dos principais marcos históricos no desenvolvimento da Mecânica das Rochas e da Geomecânica dos meios descontínuos (consultar: Bock, 2006; Rocha, 2013; Simões Cortez, 2016). ....   | 19 |
| <b>Figura 9</b> - Cálculo do tamanho dos blocos (ISRM, 1978; Gonzalez de Vallejo & Ferrer, 2011). ....  | 23 |
| <b>Figura 10</b> - Ábaco para a determinação do $RQD_{teórico}$ através do espaçamento médio das descontinuidades, em que $t$ é “threshold” ou seja o limiar do RQD (adaptado Priest, 1993). ....   | 24 |
| <b>Figura 11</b> - Exemplos de diferentes tipos de grau de alteração em maciços rochosos (maciço de S. Cristóvão, Cinfães). ....  | 26 |
| <b>Figura 12</b> - Parâmetros geológico – geotécnicos das descontinuidades presentes num maciço rochoso (ISRM, 1978, 1981, 2007, 2015). ....  | 27 |
| <b>Figura 13</b> - Representação esquemática de taludes: A) Taludes naturais; B) Taludes artificiais (adaptado de Gonzalez de Vallejo & Ferrer, 2011). ....   | 31 |
| <b>Figura 14</b> - Representação esquemática de uma rotura planar (adaptado de Gonzalez de Vallejo & Ferrer, 2011). ....  | 32 |
| <b>Figura 15</b> - Representação esquemática de uma rotura em cunha (adaptado de Vallejo & Ferrer, 2011). ...   | 33 |
| <b>Figura 16</b> - Representação esquemática de uma rotura por tombamento (adaptado de Gonzalez de Vallejo & Ferrer, 2011). ....  | 33 |
| <b>Figura 17</b> - Forças que atuam sobre uma superfície de rotura num talude e respetivo coeficiente de segurança (adaptado de Gonzalez de Vallejo & Ferrer, 2011). ....   | 36 |
| <b>Figura 18</b> - Tipos de classificações geomecânicas e as características dos maciços rochosos (adaptado de Bieniawski, 1989; Hoek, 2007). ....  | 37 |
| <b>Figura 19</b> - Parâmetros utilizados na classificação RMR (adaptado de Bieniawski, 1989). ....  | 38 |
| <b>Figura 20</b> - Ábaco de Miller para o cálculo da resistência à compressão da rocha partindo dos dados obtidos do Martelo de Schmidt (adaptado de Gonzalez de Vallejo & Ferrer, 2011). ....  | 41 |
| <b>Figura 21</b> - Roturas prováveis de acordo com o SMR (adaptado de Romana, 1985, 1997). ....   | 44 |



|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 22</b> - Métodos de suporte propostos para um determinado valor de SMR obtido (Romana, 1985, 1997). .....   | 44 |
| <b>Figura 23</b> - Breve explicação da determinação do GSI (adaptado de Hoek, 1994; Hoek & Marinos, 2000; Marinos & Hoek, 2001). .....  | 46 |
| <b>Figura 24</b> - Alterações realizadas ao GSI (versão 2000) (adaptado de Hoek et al., 2013). .....  | 47 |
| <b>Figura 25</b> - Classificação das características das descontinuidades (adaptado de Bieniawski, 1989). .....   | 48 |
| <b>Figura 26</b> - Expressão para cálculo do GSI (versão 2013) e respetivo ábaco de quantificação (adaptado de Hoek et al., 2013). .....  | 49 |
| <b>Figura 27</b> - Identificação dos fatores e parâmetros em avaliação na proposta para o índice de qualidade (adaptado de Pinheiro et al., 2015). .....  | 51 |
| <b>Figura 28</b> - Novas categorias adicionadas ao RHRS <sub>m</sub> e a respetiva avaliação (Budetta, 2004; Pinheiro et al., 2015). .....  | 53 |
| <b>Figura 29</b> - Metodologia para obtenção do SQI (adaptado de Pinheiro et al., 2015). .....  | 54 |
| <b>Figura 30</b> - Cálculo do índice de qualidade do talude (SQI) (adaptado de Pinheiro et al., 2015). .....  | 55 |
| <b>Figura 31</b> - Condições para ocorrer uma rotura em cunha e exemplo de aplicação do teste de Markland (adaptado de Wyllie & Mah, 2004). .....   | 58 |
| <b>Figura 32</b> - Exemplo de escorregamento de uma cunha originada pelo contacto entre dois planos de descontinuidade (adaptado de Wyllie & Mah, 2004). .....  | 59 |
| <b>Figura 33</b> - Exemplo de escorregamento de uma cunha provocada pelo contacto de apenas um plano de descontinuidade (adaptado de Wyllie & Mah, 2004). .....   | 59 |
| <b>Figura 34</b> - Características de uma rotura em cunha (adaptado de <a href="http://www.rocscience.com/">http://www.rocscience.com/</a> ). .....   | 60 |
| <b>Figura 35</b> - Tipos de análise disponíveis no Swedge (adaptado de Rocscience - <a href="http://www.rocscience.com/">http://www.rocscience.com/</a> ). .....  | 61 |
| <b>Figura 36</b> - Modo de funcionamento do programa RocFall (Rocscience - <a href="http://www.rocscience.com/">http://www.rocscience.com/</a> ). ....  | 62 |
| <b>Figura 37</b> - A) Cidade de Cinfães e o Rio Douro; B) Igreja de S. Cristóvão de Nogueira (A - <a href="http://picssr.com/photos/spimenta/">http://picssr.com/photos/spimenta/</a> ; B - <a href="http://cultura.culturamix.com/">http://cultura.culturamix.com/</a> ). .....  | 65 |
| <b>Figura 38</b> - A) Estaleiro da Barragem do Carrapatelo; B) Barragem do Carrapatelo e Cinfães (A - <a href="http://www.ordemengenheiros.pt/pt/centro-de-informacao/">http://www.ordemengenheiros.pt/pt/centro-de-informacao/</a> ; B - <a href="http://electricideas.wordpress.com/">http://electricideas.wordpress.com/</a> ). .. | 65 |
| <b>Figura 39</b> - Localização geográfica da escarpa rochosa de S. Cristóvão (Cinfães). .....   | 66 |
| <b>Figura 40</b> - Aspetos gerais da escarpa rochosa de S. Cristóvão. ....  | 67 |
| <b>Figura 41</b> - Mapa de declives da escarpa rochosa de S. Cristóvão (Cinfães). .....   | 68 |
| <b>Figura 42</b> - Enquadramento geológico da escarpa rochosa de S. Cristóvão (Cinfães) (adaptado e revisto de Teixeira et al., 1968). .....  | 69 |
| <b>Figura 43</b> - Aspetos de campo das formações geológicas aflorantes na área de S. Cristóvão: A) falha subvertical; B) alteração do granito; C) bloco rochoso destacado do maciço; D) pormenor do granito de grão médio. ....  | 70 |
| <b>Figura 44</b> - Enquadramento geomorfológico da escarpa rochosa de S. Cristóvão (Cinfães). ....  | 72 |
| <b>Figura 45</b> - Diagrama termo – pluviométrico de S. Cristóvão de Nogueira ( <a href="http://www.climate-data.org/">http://www.climate-data.org/</a> )... 74   | 74 |
| <b>Figura 46</b> - Carta de ocupação do solo na área envolvente à escarpa rochosa de S. Cristóvão (Cinfães). ....   | 75 |
| <b>Figura 47</b> - Caracterização geral da escarpa rochosa de S. Cristóvão (Cinfães). .....   | 76 |
| <b>Figura 48</b> - Aspetos gerais da Zona Geotécnica 1: A), B) vista do maciço rochoso cartografado; C) família principal de descontinuidades (NW-SE); D) pormenor da abertura e preenchimento argiloso das descontinuidades. ....  | 80 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Figura 49</b> - Aspectos gerais da Zona Geotécnica 2: A), D) vista do maciço rochoso cartografado; B) família principal de descontinuidades (NW-SE) e compartimentação em grande do maciço com blocometria típica equidimensional a prismática na qual se evidencia as descontinuidades sub-horizontais; C) pormenor da foto reproduzida em B).....   | 82  |
| <b>Figura 50</b> - Aspectos gerais da Zona Geotécnica 3: A) vista do maciço rochoso cartografado; B) família de descontinuidades sub-paralela ao talude (NNE-SSW) e compartimentação em grande do maciço com blocometria típica romboédrica a prismática na qual se evidencia as descontinuidades sub-horizontais; C) zona do talude muito húmida e com muita vegetação; D) pormenor da foto reproduzida em C), onde se observa a escorrência, por vezes, com fluxo de água. ....                    | 84  |
| <b>Figura 51</b> - Aspectos gerais da Zona Geotécnica 4: A) vista do topo superior do maciço rochosos cartografado onde se observa o grau de compartimentação do maciço e rotura mais típica associada (planar), com geometria prismática; B), C) compartimentação em grande do maciço, evidenciando-se os potenciais tipos de rotura (por cunha); D) pormenor de caixa de falha do sistema análogo à falha regional do Carrapatelo (Teixeira et al., 1968; Teixeira, 1973). ....                    | 86  |
| <b>Figura 52</b> - Aspectos gerais da Zona Geotécnica 5: A), B), C) vista geral do maciço rochoso muito alterado e por vezes com passagens medianamente alteradas (ver foto D); D) pormenor do grau de alteração típico da maior parte do maciço (W <sub>4-5</sub> ), encontrando-se muito arenizado e argiloso, de tons amarelados. ....  | 88  |
| <b>Figura 53</b> - Cartografia de zonamento geotécnico para a escarpa rochosa de S. Cristóvão (Cinfães). ....  | 90  |
| <b>Figura 54</b> - Geometria típica dos blocos rochosos nas zonas geotécnicas 1, 2, 3 e 4. ....  | 91  |
| <b>Figura 55</b> - Cartografia de zonamento geomecânico da escarpa rochosa de S. Cristóvão.....  | 94  |
| <b>Figura 56</b> - Modelo tridimensional geoestrutural da escarpa de S. Cristóvão (Cinfães). ....  | 96  |
| <b>Figura 57</b> - Parâmetros usados na aplicação do teste de Markland. ....   | 97  |
| <b>Figura 58</b> - Análise da estabilidade para a escarpa de S. Cristóvão: A) ZG1; B) ZG2; C) ZG3; D) ZG4; E) ZG5; F) atitudes médias e variações angulares das três famílias de descontinuidades e atitudes dos sentidos médios de escorregamento efetivo nas cinco zonas geotécnicas. ....   | 99  |
| <b>Figura 59</b> - Procedimento para aplicação do programa Swedge. ....  | 100 |
| <b>Figura 60</b> - Informações obtidas após o cálculo da estabilidade das cunhas através do programa Swedge. ....  | 101 |
| <b>Figura 61</b> - Etapas de aplicação do programa RocFall. ....   | 106 |
| <b>Figura 62</b> - Modelação da queda de blocos para a zona geotécnica 2.....  | 107 |
| <b>Figura 63</b> - Modelação da queda de blocos para a zona geotécnica 3.....  | 108 |
| <b>Figura 64</b> - Cartografia da suscetibilidade e grau de perigosidade para o talude de S. Cristóvão. ....   | 111 |
| <b>Figura 65</b> - Instabilização provocada pelas raízes. ....   | 112 |
| <b>Figura 66</b> - Soluções de proteção e estabilização para a escarpa de S. Cristóvão (adaptado de NEC & LABCARGA, 2016). ....  | 113 |
| <b>Figura 67</b> - Solução de proteção com: A) Barreiras dinâmicas sub-horizontais; B) Barreiras dinâmicas sub-horizontais e barreiras rígidas no topo; C) Barreiras dinâmicas inclinadas; D) Rede de arame de aço galvanizado; E) Barreira rígida constituída por perfis HEB e malha electrossoldada (adaptado de NEC & LABCARGA, 2016).....  | 115 |
| <b>Figura 68</b> - A) Panorâmica tridimensional, através de modelação computacional, da escarpa com as soluções de reforço e de proteção (Ferraz, 2016); B) Sobreposição do zonamento geotécnico e geomecânico com a modelação virtual; C) Vista de perfil da escarpa de S. Cristóvão com as soluções de reforço e de proteção (Março-Maio de 2017); D) Rede metálica na zona geotécnica 4; E) Colocação das barreiras dinâmicas no topo da escarpa; F) Barreira flexível na zona geotécnica 3. .... | 117 |
| <b>Figura 69</b> - A) Fio do tempo do incidente na escarpa de S. Cristóvão (2015/2016); B) Interações entre a CMC e as diversas empresas e instituições envolvidas.....  | 125 |

---

(Página propositadamente em branco)

---

## ÍNDICE DE QUADROS

|  |    |
|--|----|
| <b>Quadro 1</b> - Descrição do tamanho do bloco unitário segundo o Índice volumétrico (adaptado de ISRM, 1978). .....  | 23 |
| <b>Quadro 2</b> - Expressões usadas para o cálculo do índice da qualidade da rocha (RQD) (Palmström, 1975, 2005; Priest, 1993). .....  | 24 |
| <b>Quadro 3</b> - Correlação entre o índice RQD e a qualidade do maciço rochoso (adaptado de Deere et al., 1967). .....  | 25 |
| <b>Quadro 4</b> - Classificação do grau de alteração (adaptado de ISRM, 1978, 1981). .....   | 26 |
| <b>Quadro 5</b> - Síntese dos parâmetros geológico – geotécnicos das discontinuidades (ISRM, 1978, 1981, 2007, 2015).....  | 29 |
| <b>Quadro 6</b> - Classificação RMR - Rock Mass Rating (adaptado de Bieniawski, 1989).....   | 39 |
| <b>Quadro 7</b> - Análise da aplicação prática da classificação RMR por classes em contextos de escavação e sustimento subterrâneo (adaptado de Bieniawski, 1989). .....   | 42 |
| <b>Quadro 8</b> - Classificação SMR (Slope Mass Rating) (adaptado de Romana, 1985). .....  | 43 |
| <b>Quadro 9</b> - Valores estimados do $m_i$ (adaptado de Hoek, 2007). .....   | 45 |
| <b>Quadro 10</b> - Descrição e respectivos pesos atribuídos às condições das discontinuidades na classificação RMR (adaptado de Bieniawski, 1989). .....   | 48 |
| <b>Quadro 11</b> - Sistemas de classificação RHRSm2 (adaptado de Pinheiro et al., 2015).....   | 52 |
| <b>Quadro 12</b> - Resumo da classificação do sistema RHRSm2 e respetiva conversão para o índice geral do talude (adaptado de Pierson et al., 1990; Budetta, 2004). .....  | 53 |
| <b>Quadro 13</b> - Classificação quantitativa e qualitativa do talude bem como o seu grau de risco associado em função do valor de SQI (Pinheiro et al., 2015).....  | 54 |
| <b>Quadro 14</b> - Peso associado a cada fator para o cálculo do SQI (adaptado de Pinheiro et al., 2015). .....  | 55 |
| <b>Quadro 15</b> - Atribuição de fatores para o cálculo do SQI (adaptado de Pinheiro et al., 2015).....  | 56 |
| <b>Quadro 16</b> - Classes De ocupação do solo na área envolvente à escarpa rochosa de S. Cristóvão (Cinfães) (cf. figura 45). .....   | 74 |
| <b>Quadro 17</b> - A) Quadro síntese de todos os parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos cartografados ao longo da “scanline” (segundo a ISRM, 1978, 1981) do maciço do talude de S. Cristóvão (Cinfães); A1) Zonas geotécnicas 1, 2 e 3; A2) Zona geotécnica 4; A3) Zona geotécnica 5. .... | 79 |
| <b>Quadro 18</b> - Quadro-síntese de todos os parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos (segundo a ISRM, 1978, 1981) do maciço da Zona Geotécnica 1 (ZG1).....   | 81 |
| <b>Quadro 19</b> - Quadro-síntese de todos os parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos (segundo a ISRM, 1978, 1981) do maciço da Zona Geotécnica 2 (ZG2).....   | 83 |
| <b>Quadro 20</b> - Quadro-síntese de todos os parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos (segundo a ISRM, 1978, 1981) do maciço da Zona Geotécnica 3 (ZG3).....   | 85 |
| <b>Quadro 21</b> - Quadro-síntese de todos os parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos (segundo a ISRM, 1978, 1981) do maciço da Zona Geotécnica 4 (ZG4).....   | 87 |
| <b>Quadro 22</b> - Quadro-síntese de todos os parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos (segundo a ISRM, 1978, 1981) do maciço da Zona Geotécnica 5 (ZG5).....   | 89 |
| <b>Quadro 23</b> - Síntese das características das cinco zonas geotécnicas do talude de S. Cristóvão, de acordo com as classificações geomecânicas RMR, SMR e GSI. ....  | 92 |

---

|   |     |
|---|-----|
| <b>Quadro 24</b> - Resumo dos parâmetros geomecânicos estimados para o talude de S. Cristóvão. ....   | 93  |
| <b>Quadro 25</b> - Valores de coesão ( $c$ ), ângulo de atrito ( $\Phi$ ) e parâmetro da rocha intacta ( $m_i$ ) para o maciço do talude de S. Cristóvão. ....  | 93  |
| <b>Quadro 26</b> - Dados utilizados e informações obtidas através do Swedge para a zona ZG1. ....   | 102 |
| <b>Quadro 27</b> - Dados utilizados e informações obtidas através do Swedge para zona ZG2. ....   | 103 |
| <b>Quadro 28</b> - Dados utilizados e informações obtidas através do Swedge para a zona ZG3. ....   | 104 |
| <b>Quadro 29</b> - Dados utilizados e informações obtidas através do Swedge para a zona ZG4. ....   | 105 |
| <b>Quadro 30</b> - Parâmetros dos materiais aplicados no programa Rocfall. ....   | 106 |
| <b>Quadro 31</b> - Síntese das características das zonas geomecânicas ZGM1, ZGM2 e ZGM3 do talude de S. Cristóvão, de acordo com os sistemas RHRSm2 e SQL. .... | 110 |

---

## ***1. INTRODUÇÃO GERAL***

---

(Página propositadamente em branco)

---

### 1.1. Enquadramento geral

O presente estudo enquadra-se na Unidade Curricular “Dissertação/Projeto/Estágio”, do 2º ano do Curso de Mestrado em Engenharia Geotécnica e Geoambiente (MEGG) do Departamento de Engenharia Geotécnica (DEG) do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), do Politécnico do Porto (P.Porto). Consiste num estudo desenvolvido durante um estágio curricular realizado, de dezembro de 2015 até julho de 2017, no Laboratório de Cartografia e Geologia Aplicada (LABCARGA), supervisionado e orientado pelo Professor Helder I. Chaminé (DEG e LABCARGA|ISEP), contando ainda com a colaboração de uma equipa multidisciplinar de docentes e investigadores (LABCARGA e NEC do ISEP) constituída pelos Doutores Maria José Afonso (DEG|ISEP) e José Teixeira (LABCARGA|ISEP e FLUP), pelo Engenheiro José Filinto Trigo (DEC e NEC|ISEP) e pela Drª Liliana Freitas (LABCARGA|ISEP).

Esta tese enquadra-se no formato Projeto, pois assenta num caso de estudo prático de engenharia, especialmente em geotecnia de taludes rochosos. Assim, a Câmara Municipal de Cinfães (CMC) solicitou um estudo geotécnico e solução de estabilidade estrutural à empresa *Golder Associates Portugal Unipessoal Lda* que por sua vez se associou aos centros de prestação de serviços especializados NEC (Núcleo de Estudos da Construção) e LABCARGA do ISEP, para desenvolverem tarefas de uma parte do estudo levado a cabo na escarpa de S. Cristovão, no município de Cinfães. Com efeito, devido a diversas ocorrências de quedas de blocos rochosos, em particular a queda de um bloco rochoso de maior dimensão, no mês de julho de 2015 numa estrada municipal, que levou ao seu encerramento, no lugar de Lavadouro, freguesia de S. Cristóvão de Nogueira, concelho de Cinfães, distrito de Viseu, cujo tráfego assume especial relevância nos períodos de Verão e no final da Primavera.

É de salientar que esta escarpa apresenta declive acentuado e o maciço rochoso encontra-se, globalmente, bastante fraturado e, em algumas zonas, alterado. Um aspeto que deverá ser salientado é que esta também foi utilizada nos 60, do século XX, como pedreira para servir a construção da barragem do Carrapatelo (Moura Esteves et al., 1971). Outro aspeto relevante na escarpa relaciona-se com a ocorrência, em julho de 2015, de um incêndio florestal que consumiu parcialmente a vegetação existente, deixando a escarpa mais exposta e daí, provavelmente, a ocorrência da queda do bloco rochoso anteriormente referido.

Assim, foi realizado um acordo entre a *Golder Associates Portugal Unipessoal Lda*, o Núcleo de Estudos da Construção (NEC|ISEP) e o Laboratório de Cartografia e Geologia Aplicada (LABCARGA|ISEP), para desenvolver um estudo de caracterização, de inspeção e de avaliação da segurança, com subsequente proposta de estabilização e de proteção da escarpa rochosa de S. Cristóvão.



---

Numa fase inicial realizaram-se, em finais de 2015 e no início do ano 2016, visitas ao local e à área envolvente com o objetivo de se realizar um reconhecimento do terreno, inspeção visual das condições geológico-geotécnicas, georreferenciação de pontos cruciais para o estudo e, por último, realizou-se uma monitorização da escarpa com recurso a um VANT – “Veículo aéreo não-tripulado”. Nesta visita ainda foi possível avaliar, de forma expedita e através de métodos observacionais as potenciais condições geológico-geotécnicas do maciço rochoso.

Nas visitas de campo realizadas posteriormente, aplicou-se a técnica de amostragem linear (“scanline sampling technique”; e.g., ISRM, 1978; Lamas, 1989; Priest, 1993; Dinis da Gama, 1995; Chaminé & Gaspar, 1995; Brady & Brown, 2004; Chaminé et al., 2013, 2015; Chaminé, 2016), em superfícies expostas do maciço com o intuito de cartografar, descrever e caracterizar as condições geológico-geotécnicas em termos de compartimentação do maciço, bem como avaliar em termos geomecânicos a resistência do material-rocha e das superfícies estruturais, com recurso ao ensaio esclerométrico. Assim, baseando-se nos dados obtidos nas visitas efetuadas realizou-se uma proposta da cartografia de zonamento geotécnico e, conseqüentemente, a aplicação das classificações geomecânicas associadas a taludes rochosos que permitirão a proposta de um zonamento geomecânico. Por último, com os estudos geotécnicos de campo e laboratório foram realizados estudos de modelação geotécnica que apoiaram o projeto e o dimensionamento da solução de proteção.

O aprofundamento de todo o trabalho de campo desenvolvido e de gabinete resultou na realização de um relatório técnico (NEC & LABCARGA|ISEP, 2016) para a *Golder Associates Portugal Unipessoal Lda* com o estudo e a solução proposta, o que permitirá uma intervenção por parte do município de Cinfães a fim de proteger a população local e restabelecer a circulação rodoviária. A signatária colaborou no referido relatório, especialmente nas fases de campo e análise de dados geológico – geotécnicos e geomecânicos, bem como participou na redação e discussão global do relatório.

O problema em vertentes e taludes naturais com grau de instabilidade é uma situação comum no nosso país, principalmente na região centro e norte do território, mais especificamente nas áreas montanhosas e mesmo em áreas urbanas e rurais (e.g., Bateira & Soares, 1997; Bateira et al., 2008, 2014; Chaminé et al., 2010a, b; Pereira et al., 2012; Santos et al., 2014; Zêzere et al., 2014, 2015; Vaz & Zêzere, 2016). Tal situação ocorre devido à presença, nesta área, de locais com relevos acentuados. Felizmente, a problemática da instabilidade de blocos em vertentes rochosos e/ou taludes naturais, tem-se tornado uma preocupação crescente e já são visíveis alguns exemplos de estudos científicos e boas práticas de intervenções para a contenção desses blocos rochosos (vide referências anteriores).

---

Assim, neste estudo será apresentado um exemplo muito interessante, num local onde foi cortado a circulação rodoviária e onde a escarpa apresenta uma altura e declive muito acentuado. A presença de condições climáticas severas e extremas (*e.g.*, intensos e bruscos períodos de precipitação e amplitudes térmicas significativas), ou até mesmo incêndios, poderá despoletar a instabilidade de blocos rochosos contribuindo para eventuais acidentes.

## 1.2. Breve contextualização do caso de estudo

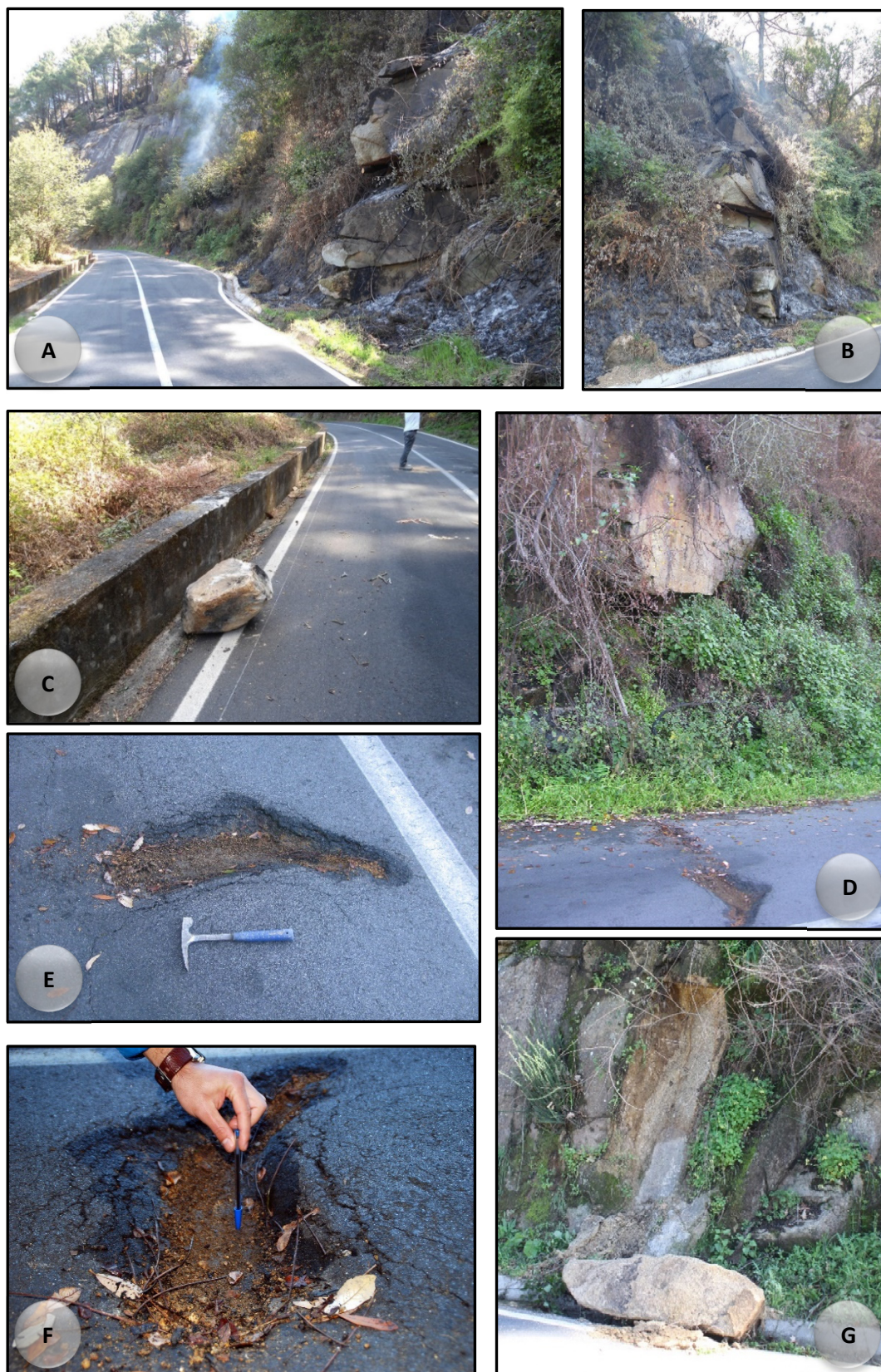
No ano 2015, mais precisamente em 16 de julho, a queda de bloco rochoso de maior dimensão (Figura 1), levou ao encerramento de uma via, cuja intensidade de tráfego assume especial relevância no período de Verão. Sendo assim a Câmara Municipal de Cinfães contratou o serviço da empresa *Golder Associates Portugal Unipessoal Lda.*, que posteriormente requisitou o serviço do NEC (Núcleo de Estudos da Construção) e o LABCARGA (Laboratório de Cartografia e Geologia Aplicada) para a elaboração de um estudo exaustivo a nível de perigosidade geotécnica e das possíveis soluções de contenção dos blocos, no qual culminou um relatório técnico que, em parte, serviu como caso de estudo deste projeto.

É ainda de salientar, como referido, que o maciço rochoso do Lavadouro nos anos 60, do século XX, foi objeto de exploração para o fornecimento de material-rocha para a construção da barragem de Carrapatelo (Moura Esteves et al., 1971). Outro aspeto relevante foi a ocorrência de um incêndio florestal nesta mesma zona, que ao devastar parcialmente a vegetação, expondo a escarpa, podendo assim ser considerado uma das possíveis causas para a queda de blocos. A existência de outros blocos rochosos em afloramento com sinais aparentes de instabilidade constitui, de facto, um potencial de perigosidade significativo para a manutenção normal de trânsito na estrada municipal<sup>1</sup>. Tal como refere em notícia a CMC: *“Após intervenção do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) que, se deslocou ao local para estudar a situação e emitir parecer relativo a este assunto, decidiu-se manter o corte da circulação automóvel e pedonal naquela zona, concretamente, no Lugar de Lavadouro, devido ao perigo eminente de derrocadas no maciço rochoso.”*<sup>2</sup>

---

<sup>1</sup> Confrontar: i) a nota informativa (9 p.) da Câmara Municipal de Cinfães (CMC) sobre “Perigo de derrocada de blocos de pedra, resultante de instabilidade de escarpa”, datada de 2015/07/16, da autoria do Técnico Superior Eng.º Luís Manuel Rodrigues de Sequeira, bem como notícias publicadas no sítio da CMC entre 7 de agosto de 2015 a 26 de maio de 2017 [<http://www.cm-cinfaes.pt/index.php/municipio-cat/item/683-transito-cortado-no-lugar-de-lavadouro>]/<http://www.cm-cinfaes.pt/index.php/municipio-cat/item/692-cortado-transito-no-lugar-de-lavadouro-s-cristovao-de-noqueira>]/<http://www.cm-cinfaes.pt/index.php/municipio-cat/item/683-transito-cortado-no-lugar-de-lavadouro> / <http://www.cm-cinfaes.pt/index.php/municipio-cat/item/867-mantem-sj>; ii) o relatório preliminar (5 p.) sobre a “estabilidade do maciço rochoso, no lugar de Lavadouro, freguesia de São Cristóvão de Nogueira, concelho de Cinfães, confinante com a Estrada Municipal que liga a Barragem do Carrapatelo ao lugar de Casal”, datado de 6/08/2015, da responsabilidade de uma equipa técnica do Departamento de Engenharia de Minas da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

<sup>2</sup> <http://www.cm-cinfaes.pt/index.php/municipio-cat/item/867-mantem-s> [consultado em janeiro de 2016].



**Figura 1 -** A), B) Imagens do incêndio de julho de 2015 que atingiu o talude do lugar do Lavadouro, S. Cristovão – Fotos Eng.º L. Sequeira (CMC); C) Fotografia de um bloco rochoso que atingiu a estrada municipal entre a Barragem do Carrapatelo e o lugar de Casal, no mês de julho de 2015 – Foto Eng.º L. Sequeira (CMC); D), E), F) Aspeto dos estragos causados no pavimento da estrada; G) Exemplo de instabilidade de blocos de dimensões apreciáveis do maciço – Foto Eng.º J.F. Trigo (fevereiro de 2016).

---

### 1.3. Objetivos

De uma forma generalista o principal objetivo, numa fase inicial, é a inspeção e avaliação das condições de segurança existentes na escarpa rochosa de S. Cristóvão e numa fase posterior a apresentação de uma proposta de solução de estabilização e proteção da escarpa. Para se atingir este objetivo geral ter-se-á necessariamente de realizar aturadas investigações *in situ* geológico-geotécnicos, estudos geotécnicos e geomecânicos, estudos de modelação geotécnica e de engenharia estrutural para realizar um coerente estudo geotécnico prévio das condições do maciço, estudos de projeto, conceção, dimensionamento e custos, bem como uma proposta final e integrada de solução de estabilização e proteção da escarpa rochosa. Este projeto centra-se nas investigações geológico-geotécnicas desenvolvidas até à modelação geotécnica (este último tópico foi esmiuçado, por exemplo, na dissertação de Ferraz, 2016). Contudo, tivemos a real possibilidade de ir acompanhado o desenvolvimento dos estudos de estabilização e proteção, bem como a execução da solução dimensionada até à recente abertura da estrada<sup>3</sup>.

De modo a respeitar o enunciado anteriormente, podem-se destacar os seguintes objetivos:

- Reconhecimento geomorfológico, geológico e hidrológico local, inspeção visual e cartografia geral dos maciços que constituem o talude;
- Caracterização geológico-geotécnica da escarpa aplicando a técnica de amostragem linear (*scanline sampling technique*) na rede de fraturação, com a finalidade de avaliar o grau de compartimentação e a avaliação geotécnica-geomecânica através da aplicação da *Basic Geotechnical Description of Rock Masses* (BGD), proposta pela *International Society for Rock Mechanics* (ISRM, 1981) e outras recomendações propostas pela ISRM (1978, 2007, 2015), pela *Geological Society Engineering Group Working Party Report* (GSE, 1995), pela *Committee on Fracture Characterization and Fluid Flow* (CFCFF, 1996) e pela *International Association of Engineering Geology* (IAEG, 1981a,b);
- Realização de ensaios geomecânicos *in situ* com recurso ao esclerómetro portátil ou “*Martelo de Schmidt – tipo L*” para obter os valores de resistência do material rochoso e da superfície de descontinuidades (ISRM, 2007, 2015);
- Definição das zonas geotécnicas baseada em todos os dados obtidos para a escarpa de S. Cristóvão;

---

<sup>3</sup> <http://www.cm-cinfaes.pt/index.php/municipio-cat/item/1206-consolidacao-de-escarpas-de-lavadouro-a-concurso>  
<http://www.cm-cinfaes.pt/index.php/municipio-cat/item/1490-reaberto-o-transito-no-lugar-de-lavadouro-s-cristovao-de-nogueira>



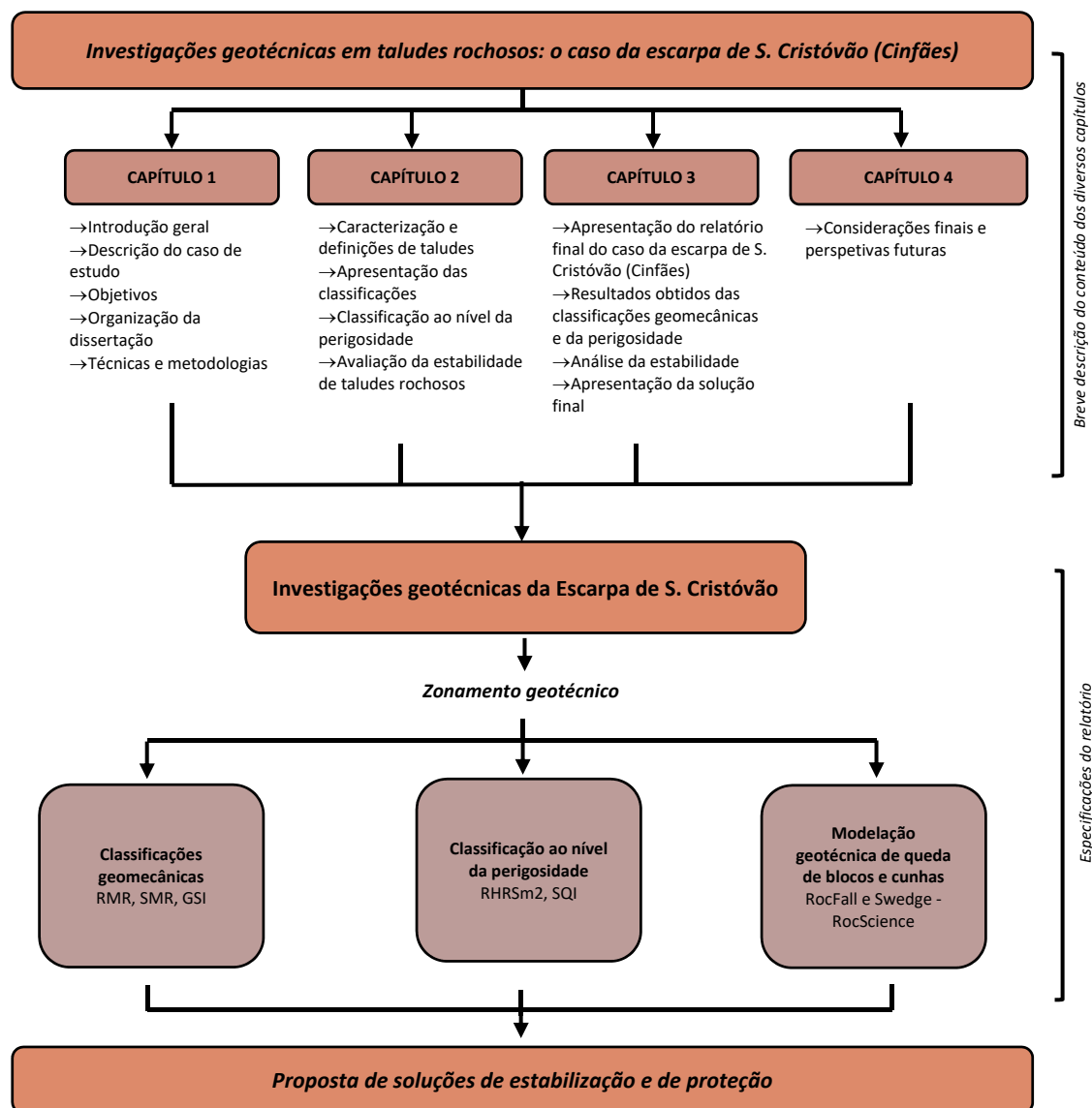
- 
- Aplicação das classificações geomecânicas, RMR – Rock Mass Rating (Bieniawski, 1976, 1984, 1989, 1993), SMR – *Slope Mass Rating* (Romana, 1985, 1993, 1997) e GSI – *Geological Strength Index* (Hoek et al., 2013) tendo em vista a caracterização da qualidade geotécnica e geomecânica dos taludes rochosos;
  - Aplicação de classificações de maciços rochosos a nível de perigosidade, RHRSm2 – *Rockfall Hazard Rating System* (versão 2015) e SQI – *Slope Quality Index* (versão 2015), bem como a proposta de cartografias do zonamento geotécnico e geomecânico;
  - Modelação geotécnica básica de queda de blocos e trajetórias com a aplicação prática do *software RocFall e Swedge* da RocScience.

#### 1.4. Organização do projeto

Este ponto é referente à organização do documento, onde é se realiza uma breve explicação dos diferentes capítulos que serão desenvolvidos ao longo deste projeto, fazendo uma junção dos aspetos mais importantes a serem retidos:

- **CAPÍTULO 1** – no decorrer deste capítulo, no qual este ponto está inserido, serão demonstradas as ideias principais referentes a este projeto, desde a introdução geral, os objetivos, a organização, entre outros. Neste ponto ainda se abordará as diferentes técnicas usadas no trabalho de campo bem como as suas implicações, que são fundamentais para a definição do resultado final;
- **CAPÍTULO 2** – um dos capítulos mais importantes, onde serão apresentadas as generalidades referentes aos taludes rochosos e às técnicas de classificação dos mesmos, que serão aplicadas no capítulo seguinte para a caracterização da escarpa rochosa a nível da sua qualidade e perigosidade;
- **CAPÍTULO 3** – este capítulo apresenta um maior desenvolvimento, pois será apresentado o caso de estudo da escarpa rochosa de S. Cristóvão (Cinfães). Neste capítulo poderá verificar-se a estrutura de um relatório para resolver o problema apresentado, ou seja, a apresentação do carácter mais geral do local, a definição do zonamento geotécnico, a aplicação das classificações geomecânicas, a análise da estabilidade e a respetiva perigosidade geotécnica. Ainda será demonstrada a proposta de uma solução final baseada em todos os resultados obtidos anteriormente;
- **CAPÍTULO 4** – último capítulo onde serão apresentadas as conclusões retiradas do caso de estudo, resumem-se algumas ideias principais bem como algumas perspetivas futuras.

Na Figura 2 apresenta-se uma síntese da abordagem metodológica adotada para o caso de estudo da escarpa de S. Cristóvão de acordo com os objetivos referidos anteriormente.



**Figura 2** - Abordagem metodológica integradora para o estudo da escarpa rochosa de S. Cristóvão (Cinfães).

### 1.5. Metodologias e técnicas

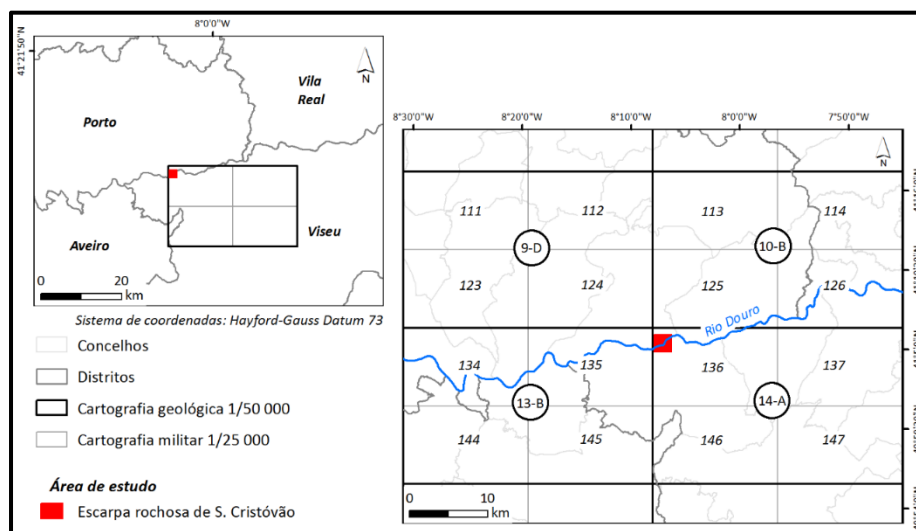
O trabalho de campo conducente à caracterização, inspeção e avaliação das condições geológico-geotécnicas e de segurança da escarpa rochosa de S. Cristóvão e envolvente foi conduzido pela equipa do ISEP (NEC & LABCARGA) durante os meses de dezembro de 2015 e de janeiro a abril de 2016.

Para atingir o objetivo fundamental anteriormente referido, desenvolveram-se atividades complementares, de gabinete e de campo, a saber:

### **Documentos cartográficos e outros elementos bibliográficos**

Relativamente à cartografia, recorreu-se aos seguintes documentos (Figura 3):

- Carta topográfica da “Carta Militar de Portugal”, à escala 1/25.000, Série M888: folha 136 (Cinfães), IGeoE (1998);
- Ortofotomapas da área de S. Cristóvão (Cinfães), à escala 1/5.000 e imagens aéreas de alta-resolução “Bing Maps” e “Google Earth Pro”;
- Cartas geológicas, geomorfológicas e tectónicas gerais a escalas várias: 1/50.000; [Carta Geológica de Portugal, folha 14-A (Lamego), de Teixeira et al. (1968)]; 1/200.000 [Carta Geológica de Portugal, de Pereira et al. (1989)]; 1/500.000 [Carta Geológica de Portugal, 5ª edição, de Oliveira et al. (1992); Carte Géomorphologique du Portugal, de Brum Ferreira (1981), Mapa de Fracturas, de Conde (1983)]; 1/1000.000 [Carta Tectónica de Portugal de Ribeiro et al. (1972) e Carta Neotectónica de Portugal de Cabral & Ribeiro (1988, 1989)];
- Cartografia fornecida pela Câmara Municipal de Cinfães, à escala 1/10.000, nomeadamente: altimetria, planimetria, hidrografia, entre outras;
- Modelo 3D e ortotomapa de alta resolução, obtidos através de levantamentos aéreos e processamento fotogramétrico das imagens.



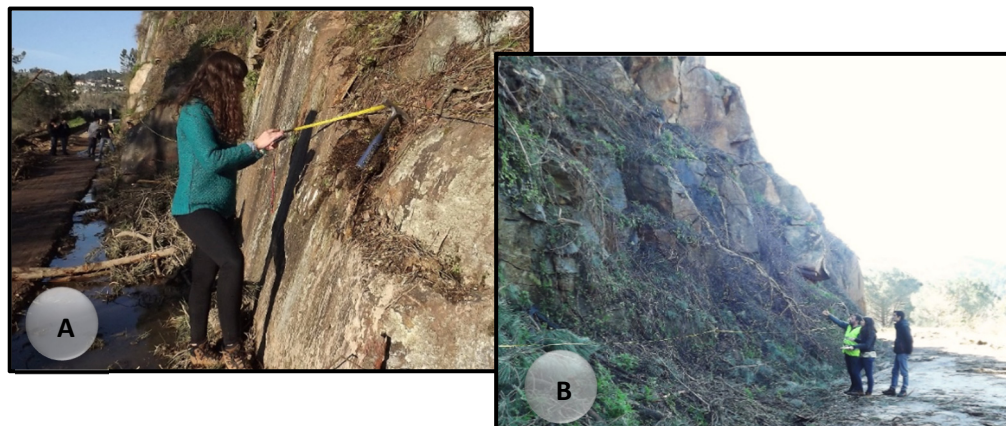
**Figura 3** - Enquadramento cartográfico da área de S. Cristóvão (Cinfães).

### **Técnica da amostragem linear em geotecnia de maciços rochosos**

A técnica de amostragem linear (Figura 4) aplica-se no estudo das discontinuidades existentes em superfícies expostas dos maciços rochosos, através de uma cartografia por domínios ou áreas representativas do maciço rochoso, estando amplamente descrita, entre outros, por Priest (1993),

---

Chaminé & Gaspar (1995), Dinis da Gama (1995), Chaminé et al. (2010 a,b, 2013, 2015), Watkins et al. (2015) e Chaminé (2016).



**Figura 4** - Aspectos ilustrativos da aplicação da técnica de amostragem linear [A] e B) cartografia geológico-geotécnica de superfícies expostas através da técnica das “scanlines” na escarpa de S. Cristóvão (Cinfães)].

Com recurso a esta técnica, recolhem-se dados de forma expedita, ao longo de linhas de amostragem representativas (“scanlines”), que permitem, por extrapolação, definir o grau de alteração, o grau de compartimentação e o grau de resistência do maciço de uma dada área em estudo. A sua aplicação minimiza muitos erros patentes em estudos de fraturação de maciços rochosos, seja pela falta de representatividade ou pela aleatoriedade da sua amostragem (*e.g.*, Terzaghi, 1965; Priest, 1993; Chaminé et al., 2015; Watkins et al., 2015; Chaminé, 2016).

A técnica de amostragem linear consiste, basicamente, na colocação de uma fita graduada (em metros) nos taludes/afloramentos rochosos (tomam a designação de painéis) a serem cartografados, aproximadamente a 1.20 – 1.50 m do solo (Priest, 1993; Dinis da Gama, 1995; Chaminé & Gaspar, 1995; Chaminé et al., 2015; Chaminé, 2016). Para cada talude cartografado, depois de colocada a fita graduada a partir do ponto de origem de cada linha de amostragem, são cartografadas de forma sistemática todas as superfícies expostas do maciço e registado as características (especialmente geológicas, geotécnicas, geomecânicas) de todas as descontinuidades intersectadas pela fita graduada. Cada ponto de amostragem (denominado por estação geotécnica) é descrito e registado em fichas de levantamento baseadas na proposta da ISRM (1981), relativa à descrição geotécnica de maciços rochosos com a denominação de “*Basic Geotechnical Description of Rock Masses*” (BGD). Todavia, há novos desenvolvimentos na aplicação desta técnica, recorrendo-se à aplicação de sistemas de informação geográfica e técnicas avançadas de geo-posicionamento global de alta precisão (Reid & Harrison, 2000).

Para cada descontinuidade que intersecta a linha de amostragem registam-se os seguintes parâmetros (ISRM, 1978, 1981; Brady & Brown, 2004; Chaminé, 2016):



- 
- **D**: distância à origem da fita graduada;
  - **L**: semi-comprimento exposto, ou seja, o comprimento visível da intersecção da descontinuidade com a face da rocha, apenas para um dos lados da fita graduada;
  - **T**: tipo de terminação que apresenta a extremidade da descontinuidade (R: na rocha; D: noutra descontinuidade; O: obscura);
  - **Atitude geológica** (direção/inclinação): medida junto ao ponto de intersecção da linha de amostragem com a descontinuidade;
  - **C**: curvatura, numa escala de  $C_1$  a  $C_5$ , em que  $C_1$  representa superfícies planas e  $C_5$  superfícies muito curvas;
  - **R**: rugosidade, numa escala de  $R_1$  a  $R_5$ , significando  $R_1$  uma superfície lisa e  $R_5$  uma superfície muito rugosa;
  - **W**: grau de alteração, numa escala de  $W_{1-2}$  a  $W_{4-5}$ , em que  $W_{1-2}$  é a ligeiramente alterada e  $W_{4-5}$  é muito a completamente alterada;
  - **F**: grau de fraturação, onde o espaçamento das descontinuidades varia de  $F_{1-2}$  (afastadas) a  $F_{4-5}$  (próximas).

Além destes parâmetros são registados, sempre que se considera relevante, outras características das descontinuidades, tais como abertura, tipo de preenchimento, presença de água ou outras observações complementares.

Todos os dados respeitantes a cada linha de amostragem são devidamente registados numa ficha de levantamento de descontinuidades na qual constam, além dos parâmetros já mencionados, os seguintes:

- Número da linha de amostragem;
- Localização da linha de amostragem;
- Atitude da linha de amostragem;
- Orientação do talude (ou hasteal, no caso de a aplicação desta metodologia a túneis) estudado;
- Litologia e grau de alteração;
- Data do levantamento;
- Rubrica do responsável pelo levantamento.

---

Para a síntese e tratamento dos inúmeros dados cartografados no terreno foram usadas a calculadora dos parâmetros básicos geológico-geotécnicos, “GeoTech|CalcTools: ScanGeoData|BGD & SchmidtData|UCS” (Fonseca et al., 2010; Chaminé et al., 2013, 2016), e a calculadora geomecânica MGC–RocDesign|CALC (Pinheiro et al., 2014). Estas permitem efetuar um cruzamento exaustivo de toda a informação e a interpretação de todos os geo-dados, de modo a apoiar o estabelecimento da compartimentação dos maciços rochosos, de cartografia de zonamento geotécnico, da avaliação geomecânica e de modelos geotécnicos conceptuais.

#### **Ensaios geomecânicos in situ: Esclerómetro portátil**

O ensaio *in situ* realiza-se com recurso ao esclerómetro portátil (*Martelo de Schmidt*, tipo L). O *Martelo de Schmidt* permite avaliar a dureza do material-rocha através do ressalto (“Rebound”, R) de uma massa de aço, que quando encostada sobre a superfície da rocha, sofre um maior ou menor ressalto mediante a dureza que a rocha possa apresentar. Esse valor fica registado no próprio equipamento, variando numa escala de 10 a 100 (graduado de 2 em 2 valores), adimensional (ISRM, 2015).

O esclerómetro deverá ser colocado de forma perpendicular à superfície rochosa a ensaiar. Essa superfície deve ser, na medida do possível, limpa, sem camadas de detritos ou películas que possam falsear os resultados dos ensaios. Outra verificação e cuidado a ter na utilização deste equipamento é a sua posição em relação ao maciço, devendo para tal ser registado na folha de levantamento de campo o referido posicionamento de entre as várias posições possíveis, pois este torna-se fulcral na conversão das unidades de resistência do maciço para MPa, através do ábaco de Miller (Gonzalez de Vallejo & Ferrer, 2011).

A ISRM (1981) recomenda que em estudos práticos de geologia de engenharia seja executada 10 medições em cada superfície ensaiada, sendo a média dos 5 valores mais elevados como valores representativos. Com a obtenção do valor médio das medições, conhecida a densidade da material rocha e a orientação do martelo em relação à superfície ensaiada, recorre-se ao ábaco de Miller. Seguidamente, obtém-se o valor da resistência à compressão uniaxial,  $\sigma_c$ , do material ensaiado. As classes de resistência de compressão, segundo a ISRM (1981), são sistematizadas em 5 termos de resistência.

#### **Veículo Aéreo Não-Tripulado (VANT)**

Os veículos aéreos não-tripulados (VANTs) ou UAV (“Unmanned Aerial Vehicle”) ou, ainda, comumente chamados de “drones” (ou “micro-drones”) surgiram inicialmente para fins militares com o objetivo de executar missões aéreas que poderiam oferecer risco aos militares (Austin, 2010). Com o desenvolvimento desta tecnologia o seu uso passou a ser mais transversal a outras

áreas desde lazer, uso militar e para vigilância, para missões de salvamento, investigação científica, entre outras, já que os VANT se tornaram mais baratos do que os veículos aéreos padrão e permitem ser pilotados remotamente.

A monitorização com VANT baseia-se na utilização de uma plataforma com capacidade para transportar variados equipamentos para registo de dados como câmaras e sensores. Estes permitem a recolha de dados a um público cada vez mais diversificado, de forma rápida, económica e segura (Fahlstrom & Gleason, 2012; Valayanis & Vachtsevanos, 2015). Os VANT possibilitam, também, o tratamento da informação recolhida pelos mesmos em tempo real ou em pós-processamento. Os dados recolhidos podem ser analisados com diversas aplicações que os tratam de acordo com os objetivos, tais como, modelação 3D, modelos de elevação, fotogrametria, índices de vegetação, cartografia geológica, etc. (e.g., Fahlstrom & Gleason, 2012; Valayanis & Vachtsevanos, 2015; Jordan, 2015). Através da obtenção de um conjunto de fotografias, com sobreposição lateral e longitudinal muito parecida à que se obtém com um avião, é possível com um VANT obter um mosaico de fotografias georreferenciadas com uma resolução espacial inferior a 5 cm, algo difícil de se obter com outro método. Além da informação geográfica, permite criar modelos 3D de qualquer objeto com um nível de detalhe muito elevado (Fahlstrom & Gleason, 2012; Valayanis & Vachtsevanos, 2015).

Atualmente, a utilização de VANTs para estudos muito localizados, como é o caso do estudo da escarpa rochosa de S. Cristóvão (Figura 5), revela-se como uma técnica fundamental pela obtenção de informação geográfica de elevada resolução a um custo de aquisição relativamente baixo (comparado a outras tecnologias) e pela rapidez na obtenção de dados e no seu processamento.



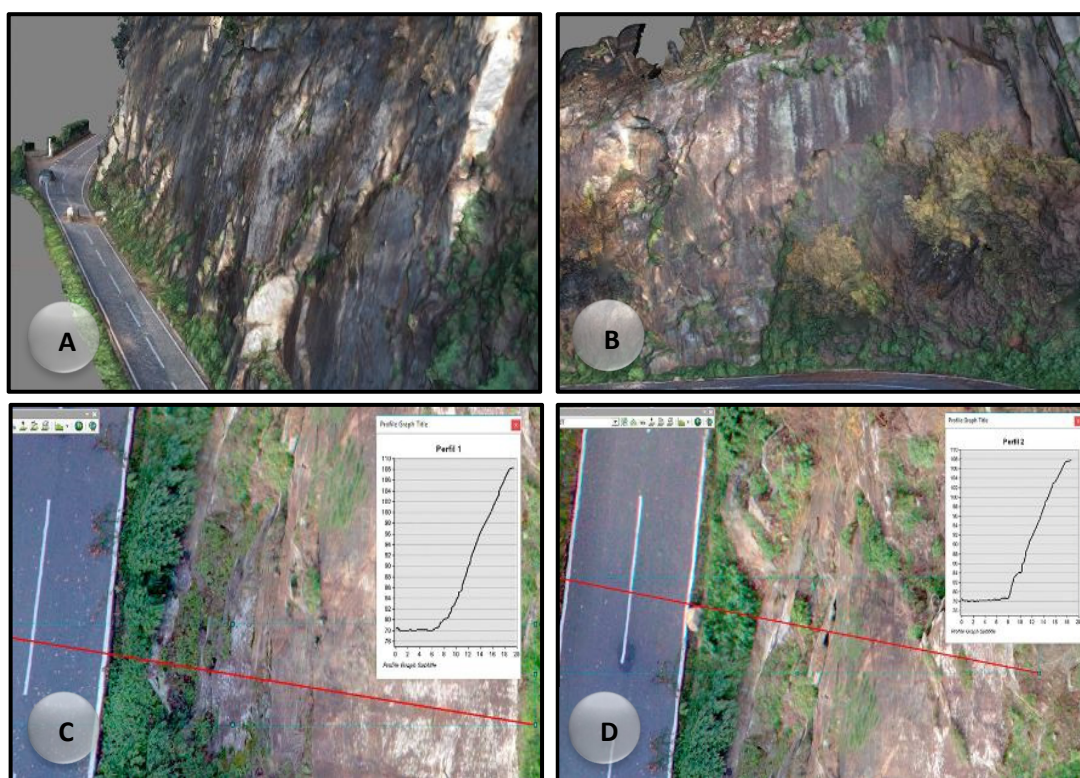
**Figura 5** - Aspetos da monitorização com o VANT, na escarpa rochosa de S. Cristóvão: A) Levantamento de ponto de controlo por GPS para georreferenciação das imagens; B) VANT em operação.

Os dados recolhidos com um VANT são posteriormente tratados e processados através de *software* de fotogrametria (e.g., *OpenDroneMap*). Este tipo de programa gera ortofotomapas georreferenciados de alta resolução, bem como o referido modelo 3D. Para a aquisição de imagens

na área de estudo recorreu-se ao VANT do tipo *Hexacopter*, usado pela SKYCAM – AERO FOOTAGE LDA, através do Eng.º Jorge Sousa, que o pilotou remotamente. Este veículo está equipado com uma câmara fotográfica convencional de alta resolução *Canon EOS 70D* (20,2 megapixéis), cujo programa permite realizar automaticamente disparos num período de tempo escolhido pelo utilizador.

O VANT é controlado de duas formas: uma é através do programa *Mission Planner*, onde são inseridos os parâmetros de voo necessários e onde é definida a área a sobrevoar pelo VANT; outra é através de um comando, utilizado para fazer as aterragens e descolagens do veículo, bem como para a definição da rota que este segue. No caso da escarpa de S. Cristóvão foram obtidas fotografias com um intervalo de 2 s, e uma sobreposição superior a 60%. Os voos foram efetuados a diversas altitudes relativamente ao solo, bem como foi realizado um voo no qual foram obtidas fotografias perpendiculares ao talude. Desta forma foi possível obter resoluções na ordem de 1 cm/pixel.

O modelo digital de terreno produzido, do qual se apresentam alguns exemplos na Figura 6, permitiu um cálculo de parâmetros relativos ao talude (e.g., comprimento, inclinação, altura, ...), bem como a construção de perfis transversais, os quais permitem compreender de forma mais pormenorizada a morfologia do talude, apoiar a conceção e o dimensionamento das soluções de reforço e de proteção, nomeadamente na fase de modelação da queda de blocos rochosos.



**Figura 6** - Aspectos da modelação tridimensional, com recurso às fotografias do VANT: A, B) vista de SW e NW da escarpa rochosa; C, D) construção de perfis transversais a partir do modelo tridimensional.

---

### **Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e levantamentos cartográficos**

No que diz respeito aos SIG, foram aplicadas diversas ferramentas recorrendo ao programa da ESRI® *ArcGIS 9.3*, para a digitalização, a georreferenciação e a vectorização de toda a documentação cartográfica, bem como para o tratamento, a integração e a síntese de toda a informação. Além disso, como complemento a este programa, recorreu-se ainda ao programa OCAD® for *Cartography* (versão 11).

O sistema de coordenadas utilizado em toda a cartografia produzida foi o Hayford-Gauss Datum73, ao qual correspondem todos os valores representados nas grelhas de coordenadas presentes nos mapas elaborados. Apesar de este sistema se considerar obsoleto, e seja recomendável a sua substituição por sistemas mais recentes (nomeadamente o sistema ETRS89/PT-TM06), optou-se pela sua utilização para minimizar os erros de conversão relativamente à cartografia cedida pela Câmara Municipal de Cinfães.

Nesta fase, georreferenciaram-se ainda alguns pontos ao longo da escarpa, tendo-se recorrido para tal aos equipamentos GPS de alta precisão, GPS Trimble GeoExplorer GeoXH2005 e GeoXH2008 (Figura 7).



**Figura 7** - A) Exemplo da utilização do GPS de alta precisão Trimble® GeoExplorer na georreferenciação de pontos de controlo para a georreferenciação de imagens; B) Georreferenciação de pontos de controlo para o levantamento VANT.

---

## ***2. GEOMECÂNICA E GEOTECNIA DE TALUDES ROCHOSOS***

---

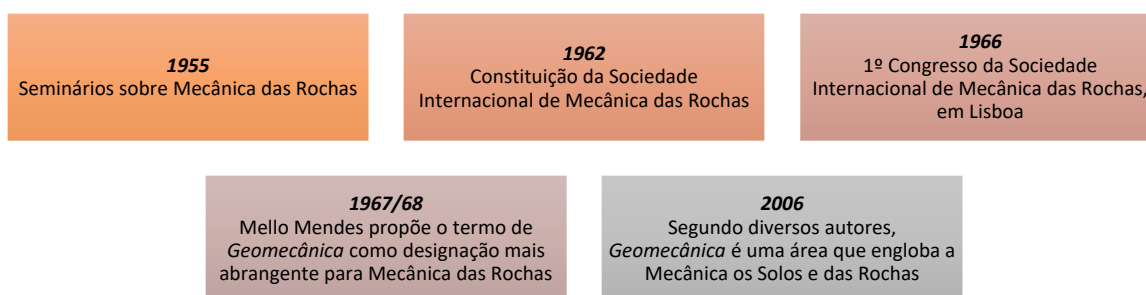
(Página propositadamente em branco)



---

## 2.1. Generalidades

A Mecânica das Rochas e a Geomecânica dos Meios descontínuos encontram-se, atualmente, em plena expansão (e.g., Rocha, 2013; Simões Cortez, 2016), tal como sucedeu à Mecânica dos Solos que se desenvolveu muitas dezenas de anos antes especialmente com o impulso das investigações e estudos pioneiros de Karl Terzaghi (cf. Terzaghi & Peck, 1987). Pois, nem sempre as áreas de estudo da Mecânica das Rochas obtiveram tanta relevância como nos dias de hoje, tal como se pode visualizar na Figura 8, só a partir do ano 1955 é que se iniciou, de uma forma consistente, a discussão desta importante temática.



**Figura 8** - Resumo dos principais marcos históricos no desenvolvimento da Mecânica das Rochas e da Geomecânica dos meios descontínuos (consultar: Bock, 2006; Rocha, 2013; Simões Cortez, 2016).

Segundo Terzaghi & Peck (1987) inicialmente, os trabalhos científicos centravam-se no estudo de rochas brandas, não consolidadas e nos solos, tornando possível afirmar que a designada Mecânica dos Solos diferenciava-se claramente da Mecânica das Rochas.

Nos últimos 60 anos a Mecânica das Rochas tem vindo a desenvolver-se, com diversas obras de referência, em 1957 a de Talobre, em 1963 a de Müller, entre outras (Rocha, 2013; Simões Cortez, 2016). Mais tarde Mello Mendes, 1967/1968, propõe uma nova designação, *Geomecânica (dos meios descontínuos)*, esta é mais abrangente e estuda o comportamento reológico dos materiais geológicos considerados na prática como rocha, sendo a generalização desses estudos os problemas que se apresentam ao Engenheiro e ao Geólogo.

A *Geomecânica* tem uma ampla aplicação nos projetos, na conceção e execução de todo o tipo de trabalhos em que é importante ter em conta o comportamento do maciço rochoso, seja em qualquer tipo de intervenção da engenharia, fundações, túneis, taludes, entre outros. Por isso, a Mecânica das Rochas não é distinguida pela sua singularidade, mas sim pela sua ampla abrangência, nomeadamente, em disciplinas como, por exemplo, a geologia estrutural, a geologia de engenharia, a mecânica dos solos e os métodos computacionais que trouxeram uma vasta versatilidade, quer a



---

nível individual em cada uma destas disciplinas, quer a nível do agrupamento de vários conhecimentos de todas elas para obter uma só resposta ao problema apresentado (Rocha, 2013).

A habitual interpenetração das fronteiras de disciplinas vizinhas é particularmente acentuada no caso das Mecânicas dos Solos e das Rochas, por isso, vários autores afirmam que a *Geomecânica* é a área científica que engloba conhecimentos extraídos de uma e de outra disciplina, bem como todas as atividades profissionais que servem ambas as disciplinas (Bock, 2006; Rocha, 2013; Simões Cortez, 2016).

Segundo Mello Mendes (1967/1968) e Rocha (2013), o estudo da *Geomecânica* debruça-se sobre o conhecimento de certas características dos maciços rochosos:

- **Deformabilidade**, isto é, as relações entre tensões e deformações;
- **Resistência**, ou seja, as condições que determinam a sua rotura;
- **Estado de tensão inicial** (ou residual) a que se encontra submetido no maciço;
- **Comportamento hidromecânico** devido à percolação da água nos maciços rochosos que por isso condicionam a sua permeabilidade.

Por isso, o estudo do comportamento dos maciços rochosos é muito importante devido às características mencionadas anteriormente, que poderão afetar a sua estabilidade. Mas existem solicitações extrínsecas à rocha que podem induzir a sua instabilidade como por exemplo, a chuva, a neve, o fogo, os sismos, entre outros (e.g., Dinis da Gama, 1995; Rocha, 2013). Em contrapartida, as suas características intrínsecas também conferem instabilidade, como por exemplo, a quantidade de descontinuidades, a sua alteração, as suas propriedades geotécnicas e hidrogeomecânicas, etc.

O estudo referente à estabilidade e instabilidade de um dado maciço rochoso é tarefa bastante complexa que envolve vários tipos de intervenção; sendo a base de todo o estudo o trabalho de campo e laboratorial e por isso, estas tarefas irão definir a qualidade global das investigações e conclusões. Para determinar as condições do maciço e sua avaliação geotécnica, utiliza-se a informação pormenorizada obtida dos estudos geológico-geotécnicos e geomecânicos.

Para uma correta aplicação das classificações geomecânicas é importante conhecer as características e as propriedades geológico-geotécnicas do material rocha, sendo por isso fundamental a recolha de informação geológica de base (essencialmente ligada à litologia e geologia estrutural), bem como as condições hidrogeológicas e geomorfológicas. De seguida é realizada uma avaliação da compartimentação do maciço rochoso através dos parâmetros

---

geométricos e mecânicos (ISRM, 2007, 2015) de todas as descontinuidades identificadas no trabalho de campo.

Numa fase mais avançada o estudo do maciço rochoso desenvolve-se com a elaboração da cartografia dos zonamentos geotécnico e geomecânico e, bem assim, do modelo conceptual geotécnico e do modelo geomecânico comportamental (e.g., Gonzalez de Vallejo & Ferrer, 2011; Rocha, 2013; Chaminé et al., 2013, 2015). Segundo Dinis da Gama (1991), a determinação das características e dos parâmetros geomecânicos do maciço é uma das propriedades fulcrais em qualquer projeto de engenharia que envolva maciços rochosos.

## **2.2. Compartimentação dos maciços rochosos**

### **2.1.1. Reconhecimento geológico**

Para o reconhecimento geológico de uma determinada área em estudo é fundamental realizar, independentemente da tipologia do terreno ou da intervenção, uma análise prévia de toda a região. Com efeito, procede-se à recolha de toda a informação de natureza topográfica, dos dados geológicos, morfotectónicos, sísmicos, hidrológicos, entre outros, que vão determinar o tipo de intervenção no terreno bem como também são fulcrais na interpretação dos dados a obter futuramente.

Uma tarefa bastante importante, que se torna determinante na escolha do processo de estudo e na definição de zonas de intervenção (pré-zonamento) dos trabalhos com objetivos diferentes na obtenção de dados, é a observação direta do maciço em estudo, bem como da sua envolvente.

### **2.1.2. Cartografia geotécnica**

Após a realização de trabalhos de campo, onde existe o reconhecimento e a caracterização do maciço rochoso, a cartografia de zonamento geotécnico representa uma matriz com uma estrutura fundamentada e com uma base capaz de suportar os dados obtidos nos trabalhos de campo anteriormente referidos.

Num maciço rochoso devem ser diferenciados os tipos de material rocha presentes, mais concretamente, a heterogeneidade litológica, a geoestrutura, o grau de alteração e fraturação, a hidrologia e a sua resistência mecânica, permitindo, posteriormente, a divisão do maciço rochoso, ou do local em estudo, em subzonas geotécnicas (CFCFF, 1996; GSE, 1995; ISRM, 2007, 2015).

---

### 2.1.3. Parâmetros dos maciços rochosos

Segundo Gonzalez de Vallejo & Ferrer (2011), uma caracterização global do maciço rochoso deve ser feita com qualidade e que se torne credível, onde deve ser baseada a partir dos dados obtidos no estudo dos afloramentos, simultaneamente com a descrição da petrofísica da matriz rochosa e das condições geotécnicas das descontinuidades identificadas. Para além destes aspetos também são importantes os seguintes:

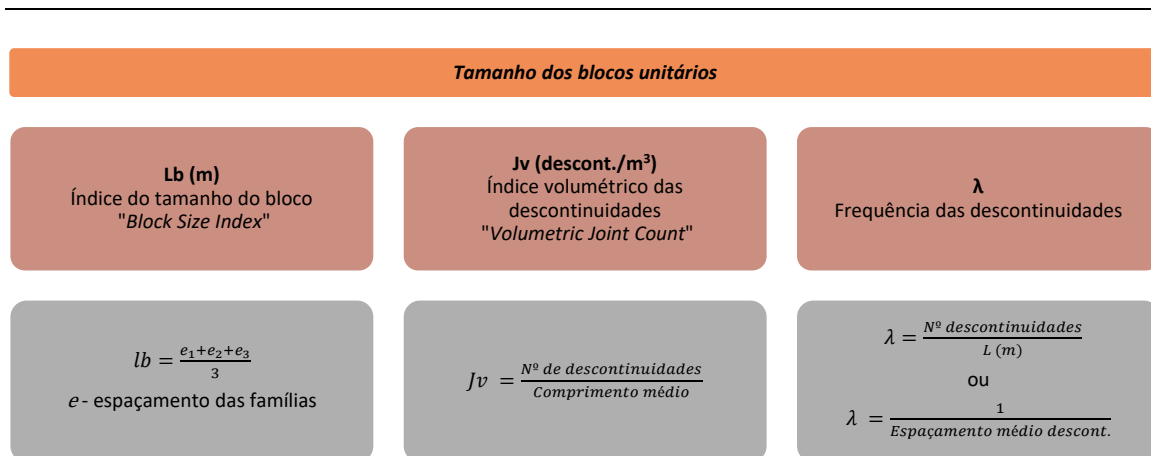
- Número e orientação das descontinuidades;
- Tipo e dimensão do bloco unitário, bem como a sua fraturação;
- Índice de qualidade da rocha (RQD);
- Grau de alteração.

Segundo as recomendações da ISRM (1978), o número de parâmetros caracterizados do maciço rochoso depende do tamanho da área em estudo, sendo assim, devem ser identificadas um número representativo de descontinuidades.

Gonzalez de Vallejo & Ferrer (2011) afirmam que os comportamentos mecânicos do maciço rochoso, como a deformabilidade e os mecanismos de rotura, são condicionados na maioria dos casos, pelo número de famílias de descontinuidades. O grau de fraturação do maciço, o tamanho e a forma dos seus blocos unitários, são definidos pelas famílias de descontinuidades e pelo espaçamento entre elas, sendo que o resultado da interação entre estas duas características dá origem ao bloco unitário.

Para a definição das famílias de descontinuidades recorre-se aos diagramas geológico-estruturais, mais concretamente os de contorno estrutural e os de rosetas, onde é possível avaliar a orientação de cada uma das descontinuidades cartografadas e estimar a orientação média de cada família de descontinuidades (Pires, 1993; Palmström & Stille, 2010).

O bloco unitário que representa um dado maciço em estudo é definido pelos parâmetros referidos anteriormente, mas também pode ser determinado através das expressões apresentadas na Figura 9.



**Figura 9** - Cálculo do tamanho dos blocos (ISRM, 1978; Gonzalez de Vallejo & Ferrer, 2011).

O Índice volumétrico das descontinuidades ( $J_v$ ), permite classificar o tamanho dos blocos, representando o número total de descontinuidades que interseitam a unidade de volume do maciço rochoso (ISRM, 1981). A utilização deste parâmetro tem uma vantagem no estudo de compartimentação do maciço, pois representa um bom índice para determinar a qualidade do maciço em estudo. No Quadro 1 visualiza-se os valores do  $J_v$  com a respetiva descrição.

**Quadro 1** - Descrição do tamanho do bloco unitário segundo o Índice volumétrico (adaptado de ISRM, 1978).

| $J_v$<br>Índice volumétrico | Descrição             |
|-----------------------------|-----------------------|
| < 1                         | Blocos muito grandes  |
| 1 - 3                       | Blocos grandes        |
| 3 - 10                      | Blocos médios         |
| 10 - 30                     | Blocos pequenos       |
| 30 - 60                     | Blocos muito pequenos |
| > 60                        | Rocha esmagada        |

Outro parâmetro que tem como objetivo avaliar a qualidade da rocha, mas em termos geotécnicos, é o designado índice RQD (*Rock Quality Designation*), proposto por Deere (1963) e Deere et al. (1967). Essa avaliação é realizada em função da observação do tarolo de sondagem retirado do interior do maciço, contabilizando apenas os tarolos intactos superiores a 10 cm presentes no comprimento total do tarolo. O índice obtém-se através da aplicação da expressão apresentada de seguida.

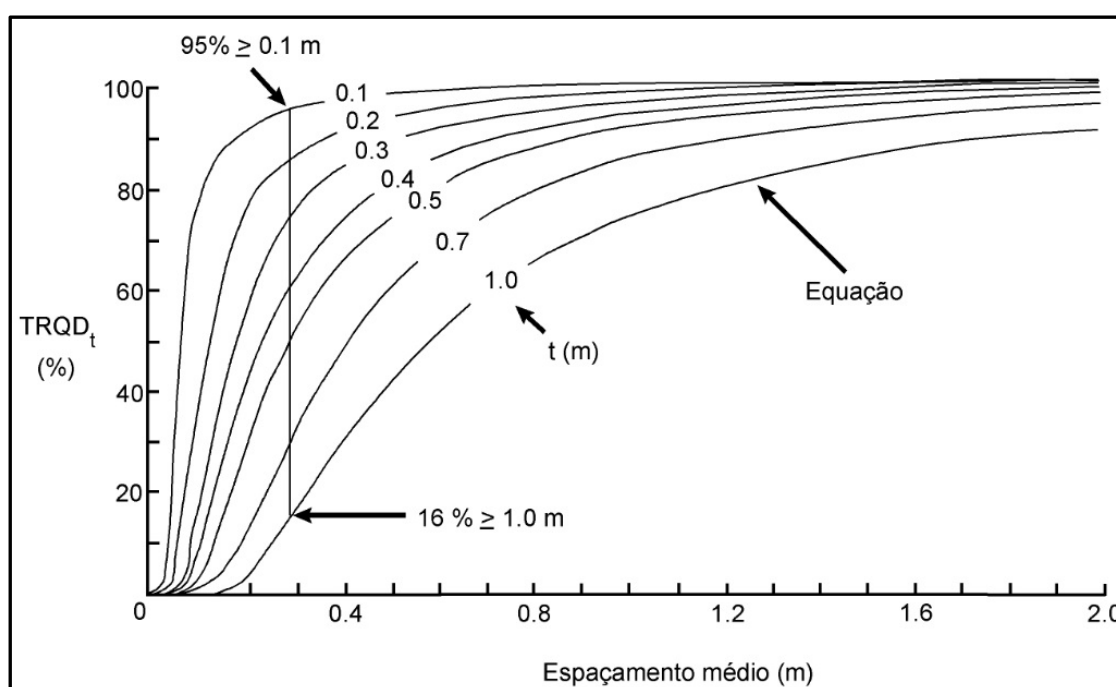
$$RQD (\%) = \frac{\sum \text{fragmentos de dimensões superiores a 10 cm}}{\text{comprimento total do tarolo de sondagem}} \times 100$$

Existem outras formas de determinar este índice de qualidade da rocha baseadas em correlações empíricas propostas por Palmström (1975, 2005) e por Priest (1993) utilizando o parâmetro da frequência das descontinuidades ( $\lambda$ ), em que todas elas estão apresentadas no Quadro 2.

**Quadro 2** - Expressões usadas para o cálculo do índice da qualidade da rocha (RQD) (Palmström, 1975, 2005; Priest, 1993).

|                  |  |
|------------------|--|
| Palmström (1975) | $J_v > 4,5 \rightarrow RQD (\%) = 115 - 3,3 \times J_v$                |
|                  | $J_v \leq 4,5 \rightarrow RQD (\%) = 100$                              |
| Priest (1993)    | $RQD (\%) = 100^{-0,1 \times \lambda} \times (0,1 \times \lambda + 1)$ |
| Palmström (2005) | $RQD (\%) = 110 - 2,5 \times J_v$                                      |

Uma outra forma de calcular, indiretamente, o valor de RQD, é através de um ábaco criado por Priest (1993) que utiliza o espaçamento médio das descontinuidades e assim obtém-se o  $RQD_{teórico}$  (%) que pode ser aplicado posteriormente na classificação GSI. Na Figura 10 pode-se visualizar o ábaco de Priest (1993).



**Figura 10** - Ábaco para a determinação do  $RQD_{teórico}$  através do espaçamento médio das descontinuidades, em que  $t$  é “threshold”, ou seja, o limiar do RQD (adaptado Priest, 1993).

De forma geral, considera-se a linha de  $t=1$  para obter um valor mais conservador em relação ao  $RQD_{teórico}$ . Os ajustes para as outras curvas do ábaco só devem ser realizados se os dados do espaçamento forem estatisticamente representativos e o intervalo de confiança cumpre os  $95\% > 0,1$  m (Priest, 1993).

---

Para perceber o que significa os resultados obtidos com as expressões anteriores, Deere et al. (1967) apresentaram uma proposta de classificação, onde é definida a qualidade do maciço em função do índice RQD (Quadro 3).

**Quadro 3** - Correlação entre o índice RQD e a qualidade do maciço rochoso (adaptado de Deere et al., 1967).

| <b><i>RQD</i></b><br><b>Índice de qualidade da rocha (%)</b> | <b>Descrição</b> |
|--|------------------|
| <b>&lt; 25</b>   | Muito fraca      |
| <b>25 - 50</b>   | Fraca            |
| <b>50 - 75</b>   | Razoável         |
| <b>75 - 90</b>   | Boa              |
| <b>90 - 100</b>  | Muito boa        |






Um outro parâmetro importante no estudo de um maciço rochoso é o seu grau de alteração e segundo Aires-Barros (1991), a alteração da rocha consiste na sua degradação e decomposição, levadas a cabo por agentes físicos e químicos naturais, que transformam essa rocha noutro produto natural, agora em equilíbrio físico-químico com o meio ambiente.

Na engenharia geotécnica, o interesse no grau de alteração surge devido à sua influência nas propriedades mecânicas de material intacto, assim como, no ângulo de atrito das superfícies rochosas (Rocha, 2013).

Para além de uma análise global da alteração nos maciços rochosos, este parâmetro deve ser verificado nas descontinuidades, pois o grau de alteração modifica características como a rugosidade e abertura que contribuem para a variação da resistência da matriz rochosa.

A avaliação deste parâmetro realiza-se por observação direta do afloramento e pela comparação com os índices padrão no Quadro 4, esta avaliação pode variar consoante a experiência do observador, sendo assim, no mesmo quadro, pode-se ver a classificação simplificada deste parâmetro segundo ISRM (1981).

**Quadro 4** - Classificação do grau de alteração (adaptado de ISRM, 1978, 1981).

| Grau de alteração   | Nomenclatura           |                  | Significado  |   |
|---|------------------------|------------------|--|---|
|  | Sã ou não alterada     | W <sub>1</sub>   | Não se observam sinais de alteração na matriz rochosa  | → Sã e compacta   |
|   |                        | W <sub>1-2</sub> |  | → Descontinuidades fechadas   |
|  | Ligeiramente alterada  | W <sub>2</sub>   | Mudanças na cor original da matriz rochosa (descoloração)  | → Permeabilidade é praticamente nula  |
|  | Moderadamente alterada | W <sub>3</sub>   | Menos de metade do material rochoso está decomposto e/ou desagregado num solo, mantendo-se a petrofábrica original | → Maciço mais ou menos são<br>→ Intersectado por descontinuidades abertas         |
|  | Muito alterada         | W <sub>4</sub>   | Mais de metade do material rochoso está decomposto e/ou desagregado num solo; a rocha é muito friável              | → Zona alterada a muito alterada ou mesmo decomposta                              |
|  | Completamente alterada | W <sub>5</sub>   | Todo o material rochoso está muito decomposto e/ou desagregado num solo residual                                   | → Permeabilidade do tipo intersticial<br>→ Pode coexistir uma circulação fissural |

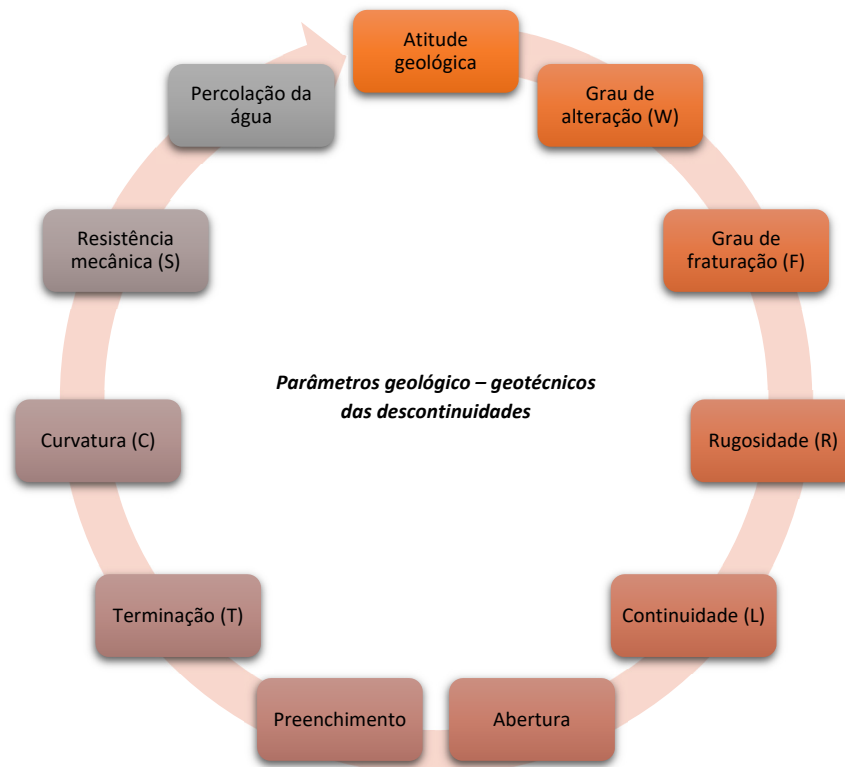
Através da Figura 11 pode-se perceber o que foi explicado anteriormente, ou seja, no mesmo maciço rochoso podem surgir vários graus de alteração, o que vai influenciar o zonamento geotécnico e consequentemente a solução de proteção a implementar.



**Figura 11** - Exemplos de diferentes tipos de grau de alteração em maciços rochosos (maciço de S. Cristóvão, Cinfães).

#### 2.1.4. Parâmetros geológicos – geotécnicos das discontinuidades

As discontinuidades desempenham um papel importante, pois condicionam a resistência, a deformabilidade e o comportamento hidráulico do maciço rochoso (Gonzalez de Vallejo & Ferrer, 2011). O principal fator que determina a resistência do maciço rochoso é a própria resistência ao corte das discontinuidades que compõe essa massa rochosa. Para tal, as discontinuidades devem ser caracterizadas de forma completa e integrada e para isso é necessário incluir os seguintes parâmetros geológico – geotécnicos apresentados na Figura 12 e no Quadro 5.



**Figura 12** - Parâmetros geológico – geotécnicos das discontinuidades presentes num maciço rochoso (ISRM, 1978, 1981, 2007, 2015).




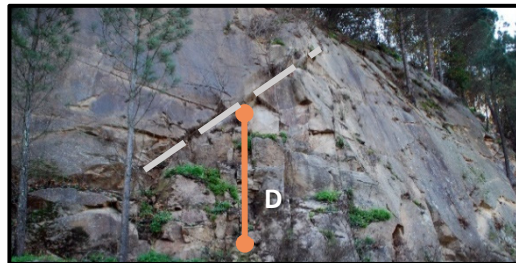
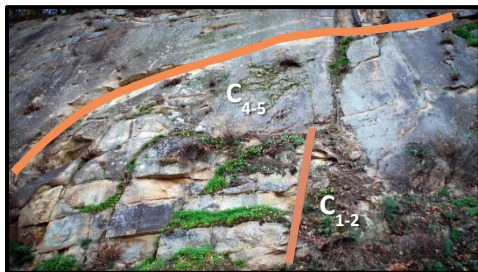


---

(Página propositadamente em branco)

Quadro 5 - Síntese dos parâmetros geológico – geotécnicos das discontinuidades (ISRM, 1978, 1981, 2007, 2015).

| Atitude geológica                    |                       |                                |  |                        |   |                                      |   |                    |              |           |                      |               |                           |                |                                  |                 |                     |             |                       |                          |           |                     |                                       |                        |                        |             |                                |                  |                    |          |                                  |                |                |    |          |
|--------------------------------------|-----------------------|--------------------------------|--|------------------------|---|--------------------------------------|---|--------------------|--------------|-----------|----------------------|---------------|---------------------------|----------------|----------------------------------|-----------------|---------------------|-------------|-----------------------|--------------------------|-----------|---------------------|---------------------------------------|------------------------|------------------------|-------------|--------------------------------|------------------|--------------------|----------|----------------------------------|----------------|----------------|----|----------|
| Representação esquemática            |                       | Descrição                      | A atitude geológica é definida através da direção e inclinação. A direção representa o ângulo que uma linha horizontal do plano define com o Norte magnético. A inclinação é definida pelo ângulo que a reta de maior declive, perpendicular à direção, define com o plano horizontal.   | Material de medição    | Bússola de Geólogo com clinómetro   | Exemplo e/ou quadro de classificação | N 65° E; 78° SE<br><br>Direção: N 65°E<br>Inclinação: 78° SE  |                    |              |           |                      |               |                           |                |                                  |                 |                     |             |                       |                          |           |                     |                                       |                        |                        |             |                                |                  |                    |          |                                  |                |                |    |          |
| Grau de fraturação (F) e espaçamento |                       |                                |  |                        |   |                                      |   |                    |              |           |                      |               |                           |                |                                  |                 |                     |             |                       |                          |           |                     |                                       |                        |                        |             |                                |                  |                    |          |                                  |                |                |    |          |
| Representação esquemática            |                       | Descrição                      | O grau de fraturação é definido pela distância entres as descontinuidades medidas através da técnica “Scanline”. O espaçamento corresponde à distância perpendicular entre duas descontinuidades, sendo maior quanto menor for o grau de fraturação do maciço. A ISRM (1981) considera que deveremos estimar o “fracture intercept” (F). | Material de medição    | Fita graduada bem esticada entre dois pontos, o seu comprimento deve ser ao longo de toda a área em estudo. Quanto maior o número e a área de medições, melhor a qualidade do estudo. | Exemplo e/ou quadro de classificação | <table><tr><th>Intervalo (cm)</th><th colspan="2">Nomenclatura</th><th colspan="2">Significado</th></tr><tr><td>&gt; 200</td><td>F<sub>1</sub></td><td rowspan="2">F<sub>1-2</sub></td><td>Muito afastadas</td><td rowspan="2">Afastadas</td></tr><tr><td>60 – 200</td><td>F<sub>2</sub></td><td>Afastadas</td></tr><tr><td>20 – 60</td><td>F<sub>3</sub></td><td>F<sub>3</sub></td><td>Medianamente afastadas</td><td>Medianamente afastadas</td></tr><tr><td>6 – 20</td><td>F<sub>4</sub></td><td rowspan="2">F<sub>4-5</sub></td><td>Próximas</td><td rowspan="2">Próximas</td></tr><tr><td>&lt; 6</td><td>F<sub>5</sub></td><td>Muito próximas</td></tr></table>                        | Intervalo (cm)     | Nomenclatura |           | Significado          |               | > 200                     | F <sub>1</sub> | F <sub>1-2</sub>                 | Muito afastadas | Afastadas           | 60 – 200    | F <sub>2</sub>        | Afastadas                | 20 – 60   | F <sub>3</sub>      | F <sub>3</sub>                        | Medianamente afastadas | Medianamente afastadas | 6 – 20      | F <sub>4</sub>                 | F <sub>4-5</sub> | Próximas           | Próximas | < 6                              | F <sub>5</sub> | Muito próximas |    |          |
| Intervalo (cm)                       | Nomenclatura          |                                | Significado  |                        |   |                                      |   |                    |              |           |                      |               |                           |                |                                  |                 |                     |             |                       |                          |           |                     |                                       |                        |                        |             |                                |                  |                    |          |                                  |                |                |    |          |
| > 200                                | F <sub>1</sub>        | F <sub>1-2</sub>               | Muito afastadas  | Afastadas              |   |                                      |   |                    |              |           |                      |               |                           |                |                                  |                 |                     |             |                       |                          |           |                     |                                       |                        |                        |             |                                |                  |                    |          |                                  |                |                |    |          |
| 60 – 200                             | F <sub>2</sub>        |                                | Afastadas  |                        |   |                                      |   |                    |              |           |                      |               |                           |                |                                  |                 |                     |             |                       |                          |           |                     |                                       |                        |                        |             |                                |                  |                    |          |                                  |                |                |    |          |
| 20 – 60                              | F <sub>3</sub>        | F <sub>3</sub>                 | Medianamente afastadas   | Medianamente afastadas |   |                                      |   |                    |              |           |                      |               |                           |                |                                  |                 |                     |             |                       |                          |           |                     |                                       |                        |                        |             |                                |                  |                    |          |                                  |                |                |    |          |
| 6 – 20                               | F <sub>4</sub>        | F <sub>4-5</sub>               | Próximas   | Próximas               |   |                                      |   |                    |              |           |                      |               |                           |                |                                  |                 |                     |             |                       |                          |           |                     |                                       |                        |                        |             |                                |                  |                    |          |                                  |                |                |    |          |
| < 6                                  | F <sub>5</sub>        |                                | Muito próximas   |                        |   |                                      |   |                    |              |           |                      |               |                           |                |                                  |                 |                     |             |                       |                          |           |                     |                                       |                        |                        |             |                                |                  |                    |          |                                  |                |                |    |          |
| Rugosidade (R)                       |                       |                                |  |                        |   |                                      |   |                    |              |           |                      |               |                           |                |                                  |                 |                     |             |                       |                          |           |                     |                                       |                        |                        |             |                                |                  |                    |          |                                  |                |                |    |          |
| Representação esquemática            |                       | Descrição                      | Este parâmetro corresponde à aspereza, em termos de ondulação, nas superfícies das descontinuidades. A rugosidade tem um papel importante na resistência ao corte nestas superfícies, ou seja, quanto maior a rugosidade, maior será a resistência ao corte e consequentemente menor a possibilidade de ocorrer uma rotura.              | Material de medição    | Inspeção visual associada à sensibilidade do tato, definindo a rugosidade em função da respetiva classificação.   | Exemplo e/ou quadro de classificação | <table><tr><th>Forma do perfil</th><th>Classe</th><th>Descrição</th><th>Nomenclatura</th></tr><tr><td rowspan="3">Denteada</td><td>I</td><td>Rugosa</td><td rowspan="3">R<sub>1-2</sub><br/>Pouco Rugosa</td></tr><tr><td>II</td><td>Lisa</td></tr><tr><td>III</td><td>Estriada</td></tr><tr><td rowspan="3">Ondulada</td><td>IV</td><td>Rugosa</td><td rowspan="3">R<sub>3</sub><br/>Medianamente rugosa</td></tr><tr><td>V</td><td>Lisa</td></tr><tr><td>VI</td><td>Estriada</td></tr><tr><td rowspan="3">Plana</td><td>VII</td><td>Rugosa</td><td rowspan="3">R<sub>4-5</sub><br/>Muito rugosa</td></tr><tr><td>VIII</td><td>Lisa</td></tr><tr><td>IX</td><td>Estriada</td></tr></table> | Forma do perfil    | Classe       | Descrição | Nomenclatura         | Denteada      | I                         | Rugosa         | R <sub>1-2</sub><br>Pouco Rugosa | II              | Lisa                | III         | Estriada              | Ondulada                 | IV        | Rugosa              | R <sub>3</sub><br>Medianamente rugosa | V                      | Lisa                   | VI          | Estriada                       | Plana            | VII                | Rugosa   | R <sub>4-5</sub><br>Muito rugosa | VIII           | Lisa           | IX | Estriada |
| Forma do perfil                      | Classe                | Descrição                      | Nomenclatura   |                        |   |                                      |   |                    |              |           |                      |               |                           |                |                                  |                 |                     |             |                       |                          |           |                     |                                       |                        |                        |             |                                |                  |                    |          |                                  |                |                |    |          |
| Denteada                             | I                     | Rugosa                         | R <sub>1-2</sub><br>Pouco Rugosa   |                        |   |                                      |   |                    |              |           |                      |               |                           |                |                                  |                 |                     |             |                       |                          |           |                     |                                       |                        |                        |             |                                |                  |                    |          |                                  |                |                |    |          |
|                                      | II                    | Lisa                           |  |                        |   |                                      |   |                    |              |           |                      |               |                           |                |                                  |                 |                     |             |                       |                          |           |                     |                                       |                        |                        |             |                                |                  |                    |          |                                  |                |                |    |          |
|                                      | III                   | Estriada                       |  |                        |   |                                      |   |                    |              |           |                      |               |                           |                |                                  |                 |                     |             |                       |                          |           |                     |                                       |                        |                        |             |                                |                  |                    |          |                                  |                |                |    |          |
| Ondulada                             | IV                    | Rugosa                         | R <sub>3</sub><br>Medianamente rugosa  |                        |   |                                      |   |                    |              |           |                      |               |                           |                |                                  |                 |                     |             |                       |                          |           |                     |                                       |                        |                        |             |                                |                  |                    |          |                                  |                |                |    |          |
|                                      | V                     | Lisa                           |  |                        |   |                                      |   |                    |              |           |                      |               |                           |                |                                  |                 |                     |             |                       |                          |           |                     |                                       |                        |                        |             |                                |                  |                    |          |                                  |                |                |    |          |
|                                      | VI                    | Estriada                       |  |                        |   |                                      |   |                    |              |           |                      |               |                           |                |                                  |                 |                     |             |                       |                          |           |                     |                                       |                        |                        |             |                                |                  |                    |          |                                  |                |                |    |          |
| Plana                                | VII                   | Rugosa                         | R <sub>4-5</sub><br>Muito rugosa   |                        |   |                                      |   |                    |              |           |                      |               |                           |                |                                  |                 |                     |             |                       |                          |           |                     |                                       |                        |                        |             |                                |                  |                    |          |                                  |                |                |    |          |
|                                      | VIII                  | Lisa                           |  |                        |   |                                      |   |                    |              |           |                      |               |                           |                |                                  |                 |                     |             |                       |                          |           |                     |                                       |                        |                        |             |                                |                  |                    |          |                                  |                |                |    |          |
|                                      | IX                    | Estriada                       |  |                        |   |                                      |   |                    |              |           |                      |               |                           |                |                                  |                 |                     |             |                       |                          |           |                     |                                       |                        |                        |             |                                |                  |                    |          |                                  |                |                |    |          |
| Continuidade (C)                     |                       |                                |  |                        |   |                                      |   |                    |              |           |                      |               |                           |                |                                  |                 |                     |             |                       |                          |           |                     |                                       |                        |                        |             |                                |                  |                    |          |                                  |                |                |    |          |
| Representação esquemática            |                       | Descrição                      | A continuidade implica a extensão em área de uma descontinuidade, ou seja, é definida pelo seu comprimento. A sua determinação torna-se difícil, sendo assim, deve-se verificar a extremidade da superfície, isto é, onde termina o comprimento da descontinuidade.  | Material de medição    | É usada uma fita graduada para medir todo o comprimento da descontinuidade.   | Exemplo e/ou quadro de classificação | <table><tr><th>Comprimento, L (m)</th><th>Continuidade</th></tr><tr><td>&lt; 1</td><td>Muito pouco contínua</td></tr><tr><td>1 – 3</td><td>Pouco contínua</td></tr><tr><td>3 – 10</td><td>Medianamente contínua</td></tr><tr><td>10 – 20</td><td>Muito contínua</td></tr><tr><td>&gt; 20</td><td>Extremamente contínua</td></tr></table>  | Comprimento, L (m) | Continuidade | < 1       | Muito pouco contínua | 1 – 3         | Pouco contínua            | 3 – 10         | Medianamente contínua            | 10 – 20         | Muito contínua      | > 20        | Extremamente contínua |                          |           |                     |                                       |                        |                        |             |                                |                  |                    |          |                                  |                |                |    |          |
| Comprimento, L (m)                   | Continuidade          |                                |  |                        |   |                                      |   |                    |              |           |                      |               |                           |                |                                  |                 |                     |             |                       |                          |           |                     |                                       |                        |                        |             |                                |                  |                    |          |                                  |                |                |    |          |
| < 1                                  | Muito pouco contínua  |                                |  |                        |   |                                      |   |                    |              |           |                      |               |                           |                |                                  |                 |                     |             |                       |                          |           |                     |                                       |                        |                        |             |                                |                  |                    |          |                                  |                |                |    |          |
| 1 – 3                                | Pouco contínua        |                                |  |                        |   |                                      |   |                    |              |           |                      |               |                           |                |                                  |                 |                     |             |                       |                          |           |                     |                                       |                        |                        |             |                                |                  |                    |          |                                  |                |                |    |          |
| 3 – 10                               | Medianamente contínua |                                |  |                        |   |                                      |   |                    |              |           |                      |               |                           |                |                                  |                 |                     |             |                       |                          |           |                     |                                       |                        |                        |             |                                |                  |                    |          |                                  |                |                |    |          |
| 10 – 20                              | Muito contínua        |                                |  |                        |   |                                      |   |                    |              |           |                      |               |                           |                |                                  |                 |                     |             |                       |                          |           |                     |                                       |                        |                        |             |                                |                  |                    |          |                                  |                |                |    |          |
| > 20                                 | Extremamente contínua |                                |  |                        |   |                                      |   |                    |              |           |                      |               |                           |                |                                  |                 |                     |             |                       |                          |           |                     |                                       |                        |                        |             |                                |                  |                    |          |                                  |                |                |    |          |
| Abertura                             |                       |                                |  |                        |   |                                      |   |                    |              |           |                      |               |                           |                |                                  |                 |                     |             |                       |                          |           |                     |                                       |                        |                        |             |                                |                  |                    |          |                                  |                |                |    |          |
| Representação esquemática            |                       | Descrição                      | Este parâmetro representa a separação entre blocos divididos por uma fratura, medida perpendicularmente ao plano da descontinuidade. A abertura tende a diminuir com a profundidade, até ao ponto em que as descontinuidades se apresentam praticamente fechadas.  | Material de medição    | Régua com precisão e marcação dos milímetros, colocada perpendicularmente às paredes da descontinuidade.  | Exemplo e/ou quadro de classificação | <table><tr><th>Abertura (mm)</th><th colspan="2">Significado</th></tr><tr><td>&lt; 0,1</td><td>Muito fechada</td><td rowspan="3">Descontinuidade “fechada”</td></tr><tr><td>0,10 – 0,25</td><td>Fechada</td></tr><tr><td>0,25 – 0,50</td><td>Parcialmente aberta</td></tr><tr><td>0,50 – 2,50</td><td>Aberta</td><td rowspan="3">Descontinuidade “Aberta”</td></tr><tr><td>2,50 - 10</td><td>Razoavelmente larga</td></tr><tr><td>&gt; 10</td><td>Larga</td></tr><tr><td>10 – 100</td><td>Muito larga</td><td rowspan="3">Descontinuidade “Muito aberta”</td></tr><tr><td>100 – 1 000</td><td>Extremamente larga</td></tr><tr><td>&gt; 1 000</td><td>Cavernosa</td></tr></table>            | Abertura (mm)      | Significado  |           | < 0,1                | Muito fechada | Descontinuidade “fechada” | 0,10 – 0,25    | Fechada                          | 0,25 – 0,50     | Parcialmente aberta | 0,50 – 2,50 | Aberta                | Descontinuidade “Aberta” | 2,50 - 10 | Razoavelmente larga | > 10                                  | Larga                  | 10 – 100               | Muito larga | Descontinuidade “Muito aberta” | 100 – 1 000      | Extremamente larga | > 1 000  | Cavernosa                        |                |                |    |          |
| Abertura (mm)                        | Significado           |                                |  |                        |   |                                      |   |                    |              |           |                      |               |                           |                |                                  |                 |                     |             |                       |                          |           |                     |                                       |                        |                        |             |                                |                  |                    |          |                                  |                |                |    |          |
| < 0,1                                | Muito fechada         | Descontinuidade “fechada”      |  |                        |   |                                      |   |                    |              |           |                      |               |                           |                |                                  |                 |                     |             |                       |                          |           |                     |                                       |                        |                        |             |                                |                  |                    |          |                                  |                |                |    |          |
| 0,10 – 0,25                          | Fechada               |                                |  |                        |   |                                      |   |                    |              |           |                      |               |                           |                |                                  |                 |                     |             |                       |                          |           |                     |                                       |                        |                        |             |                                |                  |                    |          |                                  |                |                |    |          |
| 0,25 – 0,50                          | Parcialmente aberta   |                                |  |                        |   |                                      |   |                    |              |           |                      |               |                           |                |                                  |                 |                     |             |                       |                          |           |                     |                                       |                        |                        |             |                                |                  |                    |          |                                  |                |                |    |          |
| 0,50 – 2,50                          | Aberta                | Descontinuidade “Aberta”       |  |                        |   |                                      |   |                    |              |           |                      |               |                           |                |                                  |                 |                     |             |                       |                          |           |                     |                                       |                        |                        |             |                                |                  |                    |          |                                  |                |                |    |          |
| 2,50 - 10                            | Razoavelmente larga   |                                |  |                        |   |                                      |   |                    |              |           |                      |               |                           |                |                                  |                 |                     |             |                       |                          |           |                     |                                       |                        |                        |             |                                |                  |                    |          |                                  |                |                |    |          |
| > 10                                 | Larga                 |                                |  |                        |   |                                      |   |                    |              |           |                      |               |                           |                |                                  |                 |                     |             |                       |                          |           |                     |                                       |                        |                        |             |                                |                  |                    |          |                                  |                |                |    |          |
| 10 – 100                             | Muito larga           | Descontinuidade “Muito aberta” |  |                        |   |                                      |   |                    |              |           |                      |               |                           |                |                                  |                 |                     |             |                       |                          |           |                     |                                       |                        |                        |             |                                |                  |                    |          |                                  |                |                |    |          |
| 100 – 1 000                          | Extremamente larga    |                                |  |                        |   |                                      |   |                    |              |           |                      |               |                           |                |                                  |                 |                     |             |                       |                          |           |                     |                                       |                        |                        |             |                                |                  |                    |          |                                  |                |                |    |          |
| > 1 000                              | Cavernosa             |                                |  |                        |   |                                      |   |                    |              |           |                      |               |                           |                |                                  |                 |                     |             |                       |                          |           |                     |                                       |                        |                        |             |                                |                  |                    |          |                                  |                |                |    |          |

Quadro 5 – (continuação).

| Preenchimento             |   |   |  |                     |   |                                      |   |                |              |             |            |                 |                                    |      |             |                          |         |          |   |         |         |    |  |       |  |        |    |      |       |       |     |    |             |
|---------------------------|---|---|--|---------------------|---|--------------------------------------|---|----------------|--------------|-------------|------------|-----------------|------------------------------------|------|-------------|--------------------------|---------|----------|---|---------|---------|----|--|-------|--|--------|----|------|-------|-------|-----|----|-------------|
| Representação esquemática |    | Descrição   | Preenchimento ou enchimento de uma descontinuidade pode definir-se como sendo o material existente entre as paredes da descontinuidade, ou seja, na abertura da mesma.   | Material de medição | Inspeção visual, usando por vezes o tato e a sensibilidade para definir o tipo de material que preenche a descontinuidade.  | Exemplo e/ou quadro de classificação | <div>Alguns tipos de preenchimento</div> <div>→ Argila mole ou dura</div> <div>→ Quartzo</div> <div>→ Rocha esmagada</div> <div>→ Terra vegetal</div> <div>→ Outro</div>  |                |              |             |            |                 |                                    |      |             |                          |         |          |   |         |         |    |  |       |  |        |    |      |       |       |     |    |             |
| Terminação (T)            |   |   |  |                     |   |                                      |   |                |              |             |            |                 |                                    |      |             |                          |         |          |   |         |         |    |  |       |  |        |    |      |       |       |     |    |             |
| Representação esquemática |    | Descrição   | Refere-se à forma como termina uma descontinuidade, ou seja, terminar numa linha formada por outra descontinuidade, numa zona pertencente ao maciço ou não se conseguir observar a sua terminação e então ser “obscura”.   | Material de medição | Inspeção visual.  | Exemplo e/ou quadro de classificação | <table><tr><th>Nomenclatura</th><th>Designação</th><th>Significado</th></tr><tr><td>D</td><td>Descontinuidade</td><td>Termina numa outra descontinuidade</td></tr><tr><td>R</td><td>Rocha</td><td>Termina na própria rocha</td></tr><tr><td>O</td><td>Obscura</td><td>Continuidade ao longo do maciço ou não é possível observar a sua terminação</td></tr></table>   | Nomenclatura   | Designação   | Significado | D          | Descontinuidade | Termina numa outra descontinuidade | R    | Rocha       | Termina na própria rocha | O       | Obscura  | Continuidade ao longo do maciço ou não é possível observar a sua terminação |         |         |    |  |       |  |        |    |      |       |       |     |    |             |
| Nomenclatura              | Designação  | Significado   |  |                     |   |                                      |   |                |              |             |            |                 |                                    |      |             |                          |         |          |   |         |         |    |  |       |  |        |    |      |       |       |     |    |             |
| D                         | Descontinuidade   | Termina numa outra descontinuidade  |  |                     |   |                                      |   |                |              |             |            |                 |                                    |      |             |                          |         |          |   |         |         |    |  |       |  |        |    |      |       |       |     |    |             |
| R                         | Rocha   | Termina na própria rocha  |  |                     |   |                                      |   |                |              |             |            |                 |                                    |      |             |                          |         |          |   |         |         |    |  |       |  |        |    |      |       |       |     |    |             |
| O                         | Obscura   | Continuidade ao longo do maciço ou não é possível observar a sua terminação |  |                     |   |                                      |   |                |              |             |            |                 |                                    |      |             |                          |         |          |   |         |         |    |  |       |  |        |    |      |       |       |     |    |             |
| Curvatura                 |   |   |  |                     |   |                                      |   |                |              |             |            |                 |                                    |      |             |                          |         |          |   |         |         |    |  |       |  |        |    |      |       |       |     |    |             |
| Representação esquemática |   | Descrição   | É uma propriedade física das descontinuidades, onde se define a curvatura que a mesma realiza ao longo do seu comprimento.   | Material de medição | Inspeção visual.  | Exemplo e/ou quadro de classificação | <table><tr><th>Nomenclatura</th><th>Designação</th></tr><tr><td>C1-2</td><td>Plana</td></tr><tr><td>C3</td><td>Algo curva</td></tr><tr><td>C4-5</td><td>Muito curva</td></tr></table>   | Nomenclatura   | Designação   | C1-2        | Plana      | C3              | Algo curva                         | C4-5 | Muito curva |                          |         |          |   |         |         |    |  |       |  |        |    |      |       |       |     |    |             |
| Nomenclatura              | Designação  |   |  |                     |   |                                      |   |                |              |             |            |                 |                                    |      |             |                          |         |          |   |         |         |    |  |       |  |        |    |      |       |       |     |    |             |
| C1-2                      | Plana   |   |  |                     |   |                                      |   |                |              |             |            |                 |                                    |      |             |                          |         |          |   |         |         |    |  |       |  |        |    |      |       |       |     |    |             |
| C3                        | Algo curva  |   |  |                     |   |                                      |   |                |              |             |            |                 |                                    |      |             |                          |         |          |   |         |         |    |  |       |  |        |    |      |       |       |     |    |             |
| C4-5                      | Muito curva   |   |  |                     |   |                                      |   |                |              |             |            |                 |                                    |      |             |                          |         |          |   |         |         |    |  |       |  |        |    |      |       |       |     |    |             |
| Resistência mecânica (S)  |   |   |  |                     |   |                                      |   |                |              |             |            |                 |                                    |      |             |                          |         |          |   |         |         |    |  |       |  |        |    |      |       |       |     |    |             |
| Representação esquemática |  | Descrição   | Está relacionado com a resistência à compressão uniaxial nas paredes das descontinuidades e depende do tipo de matriz rochosa, do grau de alteração e da existência ou não de preenchimento.<br><br>Este parâmetro influencia diretamente a resistência ao corte e a deformabilidade das descontinuidades. | Material de medição | Existem duas possibilidades, dependendo da situação:<br>→ <b>Ensaaios <i>in situ</i>:</b> Martelo de Schmidt;<br><b>Ensaaios laboratoriais:</b> ensaio à compressão uniaxial. | Exemplo e/ou quadro de classificação | <table><tr><th>Valores de MPa</th><th colspan="2">Nomenclatura</th><th colspan="2">Designação</th></tr><tr><td>&gt; 200</td><td>S1</td><td rowspan="2">S1-2</td><td>Muito elevada</td><td rowspan="2">Elevada</td></tr><tr><td>60 – 200</td><td>S2</td><td>Elevada</td></tr><tr><td>20 – 60</td><td colspan="2">S3</td><td colspan="2">Média</td></tr><tr><td>6 – 20</td><td>S4</td><td rowspan="2">S4-5</td><td>Baixa</td><td rowspan="2">Baixa</td></tr><tr><td>&lt; 6</td><td>S5</td><td>Muito baixa</td></tr></table> | Valores de MPa | Nomenclatura |             | Designação |                 | > 200                              | S1   | S1-2        | Muito elevada            | Elevada | 60 – 200 | S2  | Elevada | 20 – 60 | S3 |  | Média |  | 6 – 20 | S4 | S4-5 | Baixa | Baixa | < 6 | S5 | Muito baixa |
| Valores de MPa            | Nomenclatura  |   | Designação   |                     |   |                                      |   |                |              |             |            |                 |                                    |      |             |                          |         |          |   |         |         |    |  |       |  |        |    |      |       |       |     |    |             |
| > 200                     | S1  | S1-2  | Muito elevada  | Elevada             |   |                                      |   |                |              |             |            |                 |                                    |      |             |                          |         |          |   |         |         |    |  |       |  |        |    |      |       |       |     |    |             |
| 60 – 200                  | S2  |   | Elevada  |                     |   |                                      |   |                |              |             |            |                 |                                    |      |             |                          |         |          |   |         |         |    |  |       |  |        |    |      |       |       |     |    |             |
| 20 – 60                   | S3  |   | Média  |                     |   |                                      |   |                |              |             |            |                 |                                    |      |             |                          |         |          |   |         |         |    |  |       |  |        |    |      |       |       |     |    |             |
| 6 – 20                    | S4  | S4-5  | Baixa  | Baixa               |   |                                      |   |                |              |             |            |                 |                                    |      |             |                          |         |          |   |         |         |    |  |       |  |        |    |      |       |       |     |    |             |
| < 6                       | S5  |   | Muito baixa  |                     |   |                                      |   |                |              |             |            |                 |                                    |      |             |                          |         |          |   |         |         |    |  |       |  |        |    |      |       |       |     |    |             |
| Percolação da água        |   |   |  |                     |   |                                      |   |                |              |             |            |                 |                                    |      |             |                          |         |          |   |         |         |    |  |       |  |        |    |      |       |       |     |    |             |
| Representação esquemática |  | Descrição   | É determinada pelo fluxo de água que percorre livremente as paredes das descontinuidades ou todo o maciço.<br>Caso exista no maciço elevados caudais de água significa que poderá haver alguns problemas de instabilidade do mesmo.  | Material de medição | Inspeção visual e sensibilidade ao tato. Não se deve descorar de qualquer informação que se ache relevante, apontando-a assim nas observações da ficha de campo.              | Exemplo e/ou quadro de classificação | <table><tr><th>Nomenclatura</th><th>Designação</th></tr><tr><td>S</td><td>Seco</td></tr><tr><td>H</td><td>Húmido</td></tr><tr><td>G</td><td>Gotejante</td></tr><tr><td>F</td><td>Fluxo</td></tr></table>  | Nomenclatura   | Designação   | S           | Seco       | H               | Húmido                             | G    | Gotejante   | F                        | Fluxo   |          |   |         |         |    |  |       |  |        |    |      |       |       |     |    |             |
| Nomenclatura              | Designação  |   |  |                     |   |                                      |   |                |              |             |            |                 |                                    |      |             |                          |         |          |   |         |         |    |  |       |  |        |    |      |       |       |     |    |             |
| S                         | Seco  |   |  |                     |   |                                      |   |                |              |             |            |                 |                                    |      |             |                          |         |          |   |         |         |    |  |       |  |        |    |      |       |       |     |    |             |
| H                         | Húmido  |   |  |                     |   |                                      |   |                |              |             |            |                 |                                    |      |             |                          |         |          |   |         |         |    |  |       |  |        |    |      |       |       |     |    |             |
| G                         | Gotejante   |   |  |                     |   |                                      |   |                |              |             |            |                 |                                    |      |             |                          |         |          |   |         |         |    |  |       |  |        |    |      |       |       |     |    |             |
| F                         | Fluxo   |   |  |                     |   |                                      |   |                |              |             |            |                 |                                    |      |             |                          |         |          |   |         |         |    |  |       |  |        |    |      |       |       |     |    |             |

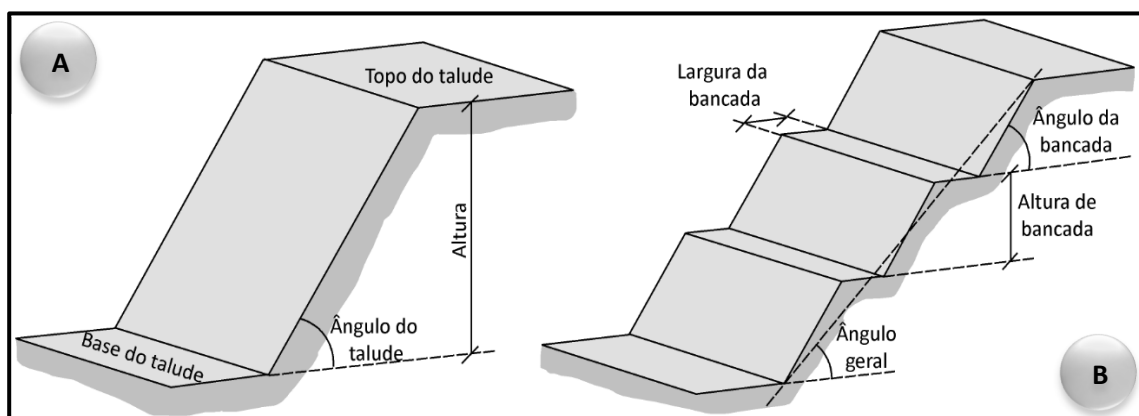
## 2.2. Estabilidade de taludes: noções básicas, tipos e análise

### → Noção

Os taludes podem ser de dois tipos, naturais ou artificiais, como se pode ver na Figura 13. Os primeiros são decorrentes de deslizamentos, desmoronamentos, por rotura e deslizamento da massa rochosa. Os artificiais são criados pelo ser humano com a finalidade de criar plataformas que permitam a criação de estradas, construção de edifícios, caminhos de ferro, entre outros e são construídos, normalmente, por escavação da rocha, através de explosivos ou meios mecânicos. Qualquer uma destas intervenções, seja natural ou artificial, cria uma instabilidade no maciço rochoso, pelo que, a análise de todo o comportamento resultante da alteração decorrente é fundamental para evitar que os processos de meteorização posteriores agravem a referida instabilidade (e.g., Wyllie & Mah, 2004; Chaminé et al., 2010b; Gonzalez de Vallejo & Ferrer, 2011).

É fulcral, no caso dos taludes naturais, a análise da estabilidade do maciço rochoso e da queda de blocos ou da instabilidade da face do talude, torna-se um risco para a segurança das pessoas e dos bens.

Relativamente aos taludes artificiais, o controlo da estabilidade é em teoria, mais fácil, pois a drenagem e a correta execução do talude, em termos da escolha da técnica de desmonte, inclinação, sistema de contenção, entre outros, representam os principais aspetos a ter em conta aquando da intervenção. Nestes casos não é provável ocorrer a rotura total do talude nem a queda de blocos, mas pode acontecer, devido a más escolhas, falta de monitorização ou simplesmente fatores externos que não se estaria à espera que acontecessem.



**Figura 13** - Representação esquemática de taludes: A) Taludes naturais; B) Taludes artificiais (adaptado de Gonzalez de Vallejo & Ferrer, 2011).

---

→ **Tipos de rotura**

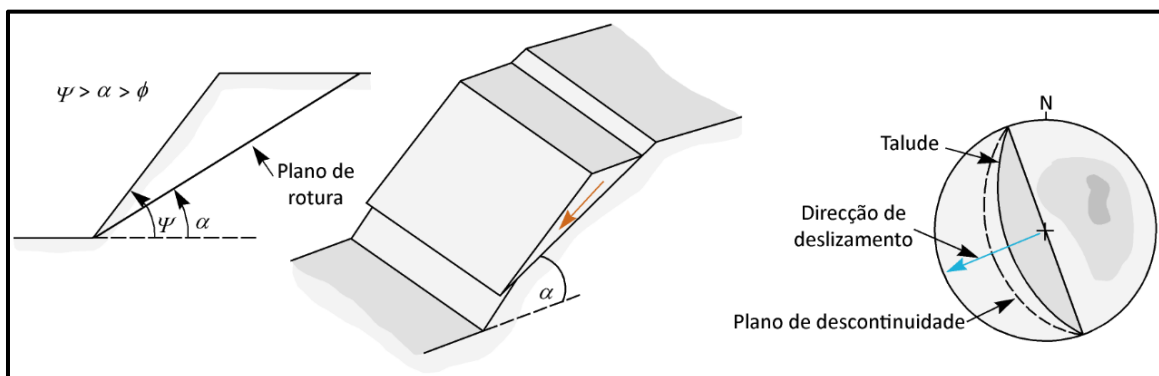
Os diferentes tipos de rotura estão condicionados pelo grau de fraturação do maciço rochoso e pela orientação e distribuição das descontinuidades no talude rochoso. A sua estabilidade é definida pela resistência da rocha e pela rocha intacta, sendo assim, existem três tipos de rotura que dependem da interligação dos fatores referidos anteriormente (e.g., Hoek & Bray, 1981; Wyllie & Mah, 2004; Gonzalez de Vallejo & Ferrer, 2011; Wyllie, 2014):

- Rotura planar;
- Rotura em cunha;
- Rotura por tombamento.

**i. Rotura planar**

Esta rotura acontece segundo uma superfície preexistente, que pode ser uma descontinuidade, como por exemplo, diaclase, falha, fratura, entre outros.

Para que este tipo de rotura ocorra é necessário que as descontinuidades presentes no maciço tenham a mesma inclinação e direção do talude, cumprindo dessa forma a condição de que a inclinação da descontinuidade ( $\alpha$ ) deverá ser menor que a do talude ( $\psi$ ) e superior ao seu ângulo de atrito interno ( $\phi$ ) (Wyllie & Mah, 2004) (Figura 14).



**Figura 14** - Representação esquemática de uma rotura planar (adaptado de Gonzalez de Vallejo & Ferrer, 2011).

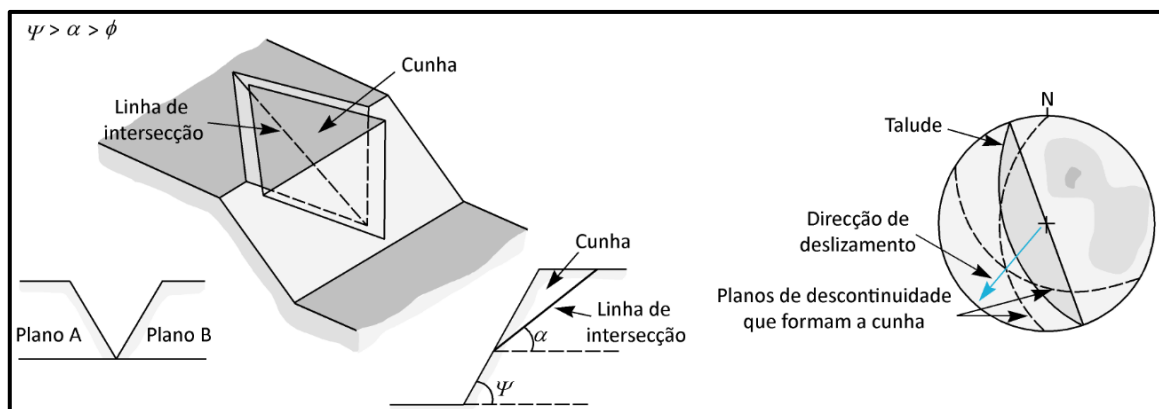


## ii. Rotura em cunha

A rotura em cunha corresponde ao deslizamento de um bloco em forma de cunha, formado pelos planos de descontinuidade, a favor de uma linha de intersecção.

Para que se produza este tipo de rotura, os planos devem aflorar na superfície do talude e devem ser cumpridas iguais condições que na rotura plana.

Este tipo de rotura só aparece em maciços com várias famílias de descontinuidades, cujo espaçamento, orientação e continuidade determina a forma e o volume da cunha (Wyllie & Mah, 2004) (Figura 15).

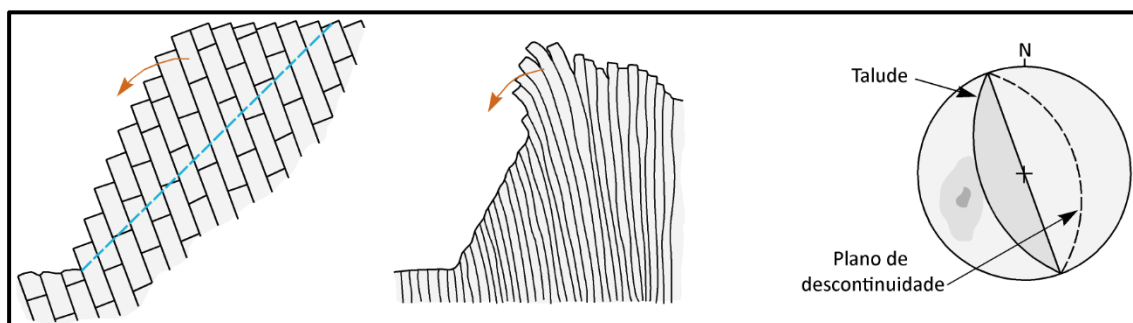


**Figura 15** - Representação esquemática de uma rotura em cunha (adaptado de Vallejo & Ferrer, 2011).

## iii. Rotura por tombamento

Esta rotura ocorre em taludes rochosos onde as descontinuidades que lhes pertencem apresentam inclinações contrárias ao talude e uma direcção paralela ou sub-paralela.

Na maioria das vezes o maciço rochoso do talude apresenta-se sob a forma de blocos individuais formados por ação de um sistema de descontinuidades ortogonais entre si. Para que ocorra este tipo de rotura, é necessário o movimento de rotação dos blocos, não estando a sua estabilidade exclusivamente condicionada pela resistência ao deslizamento (Wyllie & Mah, 2004) (Figura 16).



**Figura 16** - Representação esquemática de uma rotura por tombamento (adaptado de Gonzalez de Vallejo & Ferrer, 2011).

---

→ **Análise de estabilidade**

A avaliação da estabilidade de um talude rochoso pode ser realizada em duas fases, na do projeto ou então quando existe uma possível instabilidade, sendo fundamental uma intervenção prévia.

Para o dimensionamento de diversas estruturas naturais ou artificiais, como para os taludes, é importante definir um coeficiente de segurança adequado, que depende da finalidade e tipologia do talude, seja ele de carácter temporário ou definitivo (Wyllie & Mah, 2004). Quando estes são definitivos, o coeficiente de segurança mais adequado que se deve adotar corresponde a um valor igual ou superior a 1,5, sendo que em alguns casos, onde o nível de segurança deve ser superior em função da obra, da envolvente, da exigência e da importância da estrutura, considera-se um coeficiente de 2,0. Nos taludes temporários, o fator de segurança que se aplica deve ser igual ou inferior a 1,3, mas sempre superior à unidade, para casos onde a estrutura não apresenta grande necessidade de resguardo de segurança.

Quando se define uma estrutura, os fatores de segurança têm uma grande influência na sua configuração e geometria, levando por vezes a grandes modificações do projeto e da ideia inicial, devido às medidas de correção ou estabilização a serem implementadas a fim de evitar movimentos do mesmo.

A análise de estabilidade nem sempre é realizada na fase de projeto, mas sim após a execução do talude, mais concretamente, após uma rotura que deve ser controlada, sendo mais fácil a determinação do mecanismo, modelo e geometria que provocou a instabilidade do talude. Tornando assim este tipo de análise numa ferramenta muito importante para a caracterização geomecânica dos materiais envolvidos e para o estudo dos fatores que influenciaram a rotura de um determinado talude e cuja informação obtida possa ser usada, posteriormente, para a resolução de problemas de taludes rochosos com características e condições envolventes idênticas. Assim, os parâmetros fundamentais no dimensionamento de taludes são o ângulo de atrito e coesão dos materiais.

Os métodos de análise de estabilidade baseiam-se num fundamento físico-mecânico no qual intervêm as forças estabilizadoras e desestabilizadoras, que atuam sobre um talude e determinam o comportamento e condições de estabilidade (Hoek & Bray, 1981; Wyllie & Mah, 2004). Estes métodos podem agrupar-se em métodos determinísticos e probabilísticos, onde se baseiam em:

- **Métodos determinísticos:** conhecidas as condições em que o talude se encontra, estes métodos indicam se o talude é estável ou não. Estes selecionam os parâmetros físicos e resistentes que controlam o comportamento do material para a partir dos quais definir o

---

estado de estabilidade ou o coeficiente de segurança do talude. São conhecidos dois grupos, os métodos de equilíbrio limite e os métodos tenso-deformacionais;

- **Métodos probabilísticos:** considera a probabilidade de rotura de um talude tendo por base as condições em que se encontra. Como é um método com alguma dificuldade de aplicação torna-se pouco aplicável.

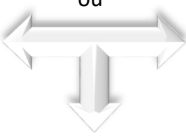
Sendo assim os métodos com maior aplicabilidade na análise de estabilidade são os de equilíbrio limite. Estes analisam o equilíbrio da massa rochosa que se encontra num estado potencialmente instável e consistem em comparar as forças favoráveis ao movimento com as forças resistentes que se opõem ao mesmo, tudo isto ao longo de uma determinada superfície de rotura.

Segundo Wyllie & Mah (2004), estes métodos de análise de estabilidade baseiam-se:

- Na seleção de uma superfície teórica de rotura existente no talude;
- No critério de rotura de Mohr – Coulomb;
- Na definição do “coeficiente de segurança”.

A determinação do coeficiente segurança (F) resulta do quociente entre as forças estabilizadoras e desestabilizadoras. Também pode ser determinado segundo as tensões existentes no talude, ou seja, é o quociente entre as tensões tangenciais resistentes e as tensões tangenciais deslizantes. De seguida apresentam-se as expressões para a determinação deste coeficiente.

$$F = \frac{\text{Forças estabilizadoras}}{\text{Forças destabilizadoras}}$$

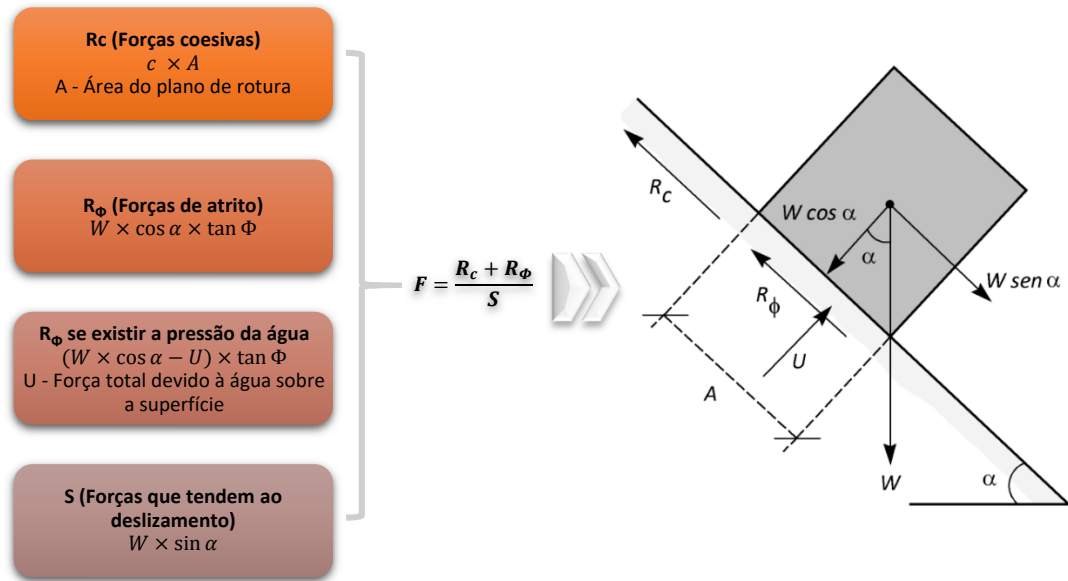
ou  


$$F = \frac{\text{Tensões tangenciais resistentes}}{\text{Tensões tangenciais deslizantes}}$$

***Coeficiente de segurança***

Avaliando o coeficiente de segurança, de seguida é necessário avaliar outras possíveis superfícies de rotura até se encontrar aquela onde o coeficiente de segurança seja o menor possível. Considerando que não existem forças externas a atuar sobre o talude, as forças que atuam num plano de rotura ou deslizamento potencial são devidas a diversos fatores que influenciam as características intrínsecas do talude, sendo estas, o peso do material (W), a coesão (c) e o atrito (Φ). Sendo assim na Figura 17 é possível perceber o mecanismo anteriormente explicado bem como o cálculo do seu coeficiente de segurança.





**Figura 17** - Forças que atuam sobre uma superfície de ruptura num talude e respetivo coeficiente de segurança (adaptado de Gonzalez de Vallejo & Ferrer, 2011).

## 2.3. Classificações geomecânicas

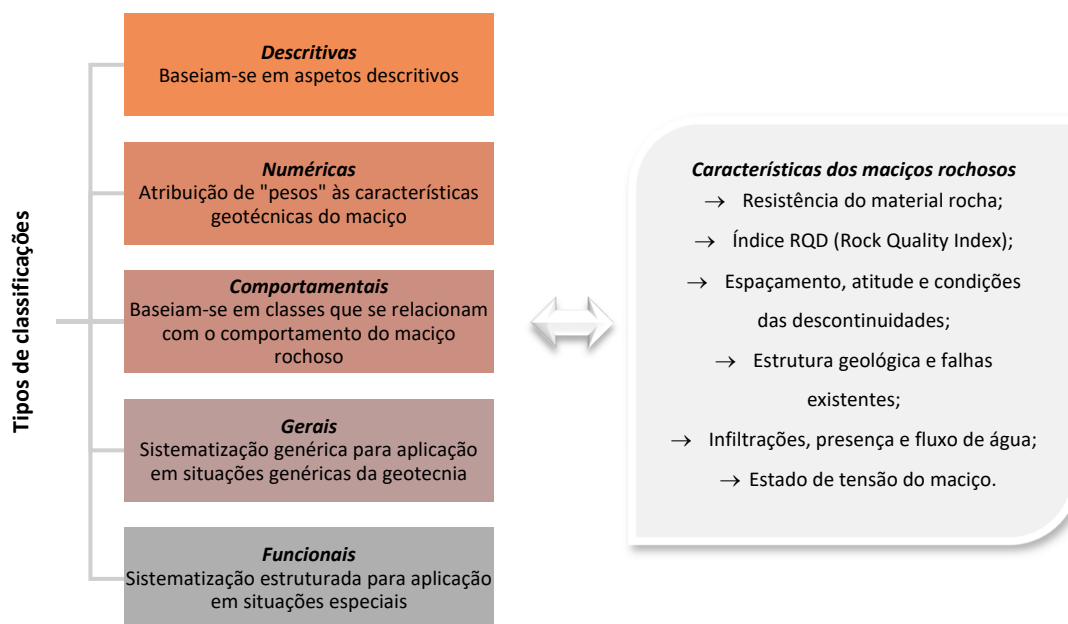
### 2.3.1. Considerações iniciais

Quando ocorrem intervenções na área de estudo dos maciços rochosos, as classificações geomecânicas desempenham um papel fulcral. As classificações têm vindo a ser melhoradas em função das descobertas de novos elementos que podiam fazer parte destas, como por exemplo, elementos de carácter geológico-estrutural, hidrogeotécnico e geomecânico que hoje em dia se recolhe em qualquer maciço rochoso e que vai apoiar a determinação da qualidade do mesmo em termos de atitude e número de discontinuidades, estado de alteração e fraturação, espaçamento, abertura, rugosidade, continuidade, presença ou ausência de percolação de água, entre outros. Como referido anteriormente, as classificações geomecânicas são uma excelente ferramenta para averiguar a qualidade de um maciço rochoso, não implicam a sua aplicação em qualquer situação, muito pelo contrário, ou seja, cada uma das classificações tem a sua especificidade e não deverá ser manipulada e aplicada sem nenhum tipo de critério de aplicação e escolha.

Estas classificações constituem um sistema de comunicação universal entre os seus utilizadores (*e.g.* engenheiros, geólogos, geotécnicos), melhorando dessa forma o conhecimento e interação entre as diversas áreas, o que se torna importante quando todas elas têm de interagir num mesmo espaço de projeto e obra.

Quando é necessário estudar taludes rochosos as classificações geomecânicas utilizadas são o RMR (Bieniawski, 1989, 1993) e o SMR (Romana, 1985, 1993, 1997), sendo este mais aceite desde o seu aparecimento (Romana et al., 2001, 2003).

Na Figura 18 estão demonstrados os principais tipos de classificações e sistematizações geomecânicas existentes bem como as características dos maciços rochosos a serem consideradas aquando da aplicação das classificações.



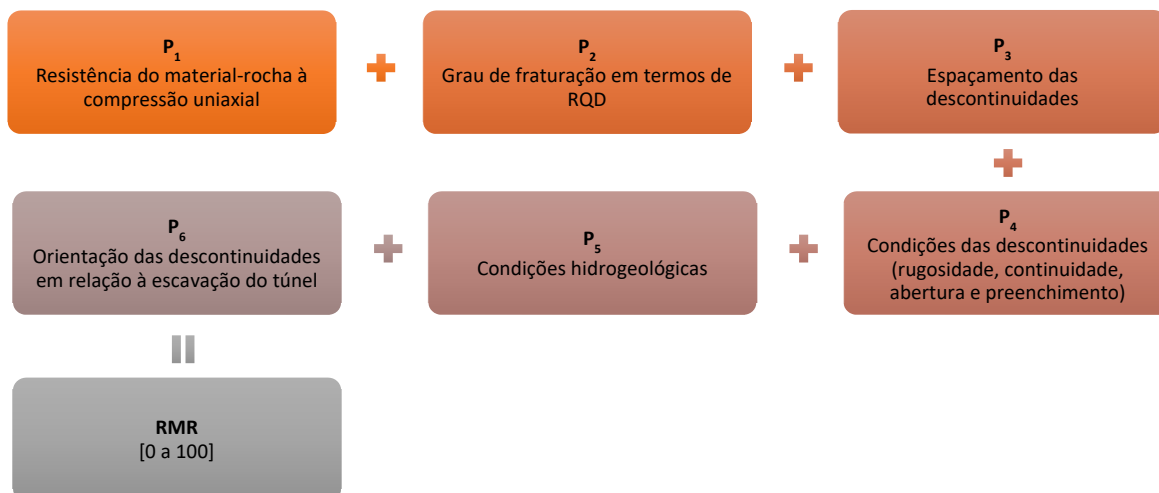
**Figura 18** - Tipos de classificações geomecânicas e as características dos maciços rochosos (adaptado de Bieniawski, 1989; Hoek, 2007).

No decorrer deste projeto, a base será a aplicação de classificações geomecânicas em taludes rochosos naturais, por isso, as classificações mais aprofundadas serão a *Rock Mass Rating* (RMR) de Bieniawski (1989), *Slope Mass Rating* (SMR) de Romana (1993, 1997) e *Geological Strength Index* (GSI) de Hoek et al. (2013). Num ponto mais à frente serão apresentadas outro tipo de classificações referentes à perigosidade geotécnica dos maciços rochosos em taludes próximo a estruturas rodoviárias.

### 2.3.2. RMR – “Rock Mass Rating”

*Rock Mass Rating* (RMR) é uma classificação geomecânica criada e desenvolvida por um autor marcante na área da engenharia de minas e da mecânica das rochas, Z. T. Bieniawski. Esta classificação tem vindo a ser melhorada, devido à acumulação de experiência adquirida nos diversos casos de estudo, permitindo assim a atualização das várias versões (1973, 1976, 1979, 1984, 1989, 1993). O seu campo de aplicação é bastante específico, designadamente, em maciços rochosos subterrâneos, cuja aplicabilidade se difundiu nos casos de obra de construção de túneis, mas também pode ser aplicada em galerias de exploração, galerias de estudo para a construção de barragens, entre outros. A classificação RMR pertence ao grupo das classificações numéricas, pois atribui pesos a parâmetros previamente definidos na tabela de classificação. De forma geral, estes

parâmetros são de características físicas, geométricas, mecânicas em relação ao maciço e em relação ao material rocha. Assim, no Quadro 6 é apresentada a classificação RMR original atualizada e na Figura 19 é possível perceber quais os parâmetros utilizados na classificação bem como a forma de obter o valor final de RMR.



**Figura 19** - Parâmetros utilizados na classificação RMR (adaptado de Bieniawski, 1989).

Um dos parâmetros a ter em conta nesta classificação é a resistência do material rocha que pode ser obtido através de três formas. A primeira é mais expedita, com recurso ao Esclerómetro Portátil, ou *Martelo de Schmidt*, onde se realiza a conversão dos valores obtidos para MPa em função do ábaco de Miller (Figura 20), os outros métodos são ensaios laboratoriais, podendo ser o ensaio à compressão uniaxial realizado em amostras devidamente recolhidas e preparadas ou o ensaio à carga pontual (*Point Load Test*).

Quando existe mais de que um conjunto de descontinuidades, os pesos dos seus espaçamentos e das suas condições devem ser considerados sempre para a situação mais crítica, salvaguardando o lado da segurança (Bieniawski, 1989, 1993).

Quando se realiza a atribuição dos pesos é importante ter em conta o enquadramento do caso de estudo, nomeadamente no parâmetro relacionado com a percolação da água, pois quando se refere a um túnel subterrâneo a importância deste parâmetro, bem como a forma de resolver o problema, é diferente quando se refere a um talude rochoso.

Com o valor obtido de RMR é possível avaliar o maciço rochoso em termos de qualidade e agrupá-lo nas seguintes categorias: Muito Boa, Boa, Razoável, Má e Muito Má. Em cada categoria é estabelecido a resistência de Mohr – Coulomb, o período de tempo em que o maciço é autoportante (aguenta sem qualquer tipo de suporte) e informações sobre a qualidade do maciço atribuído. Para além dos dados anteriormente referidos para cada categoria, Bieniawski (1989)

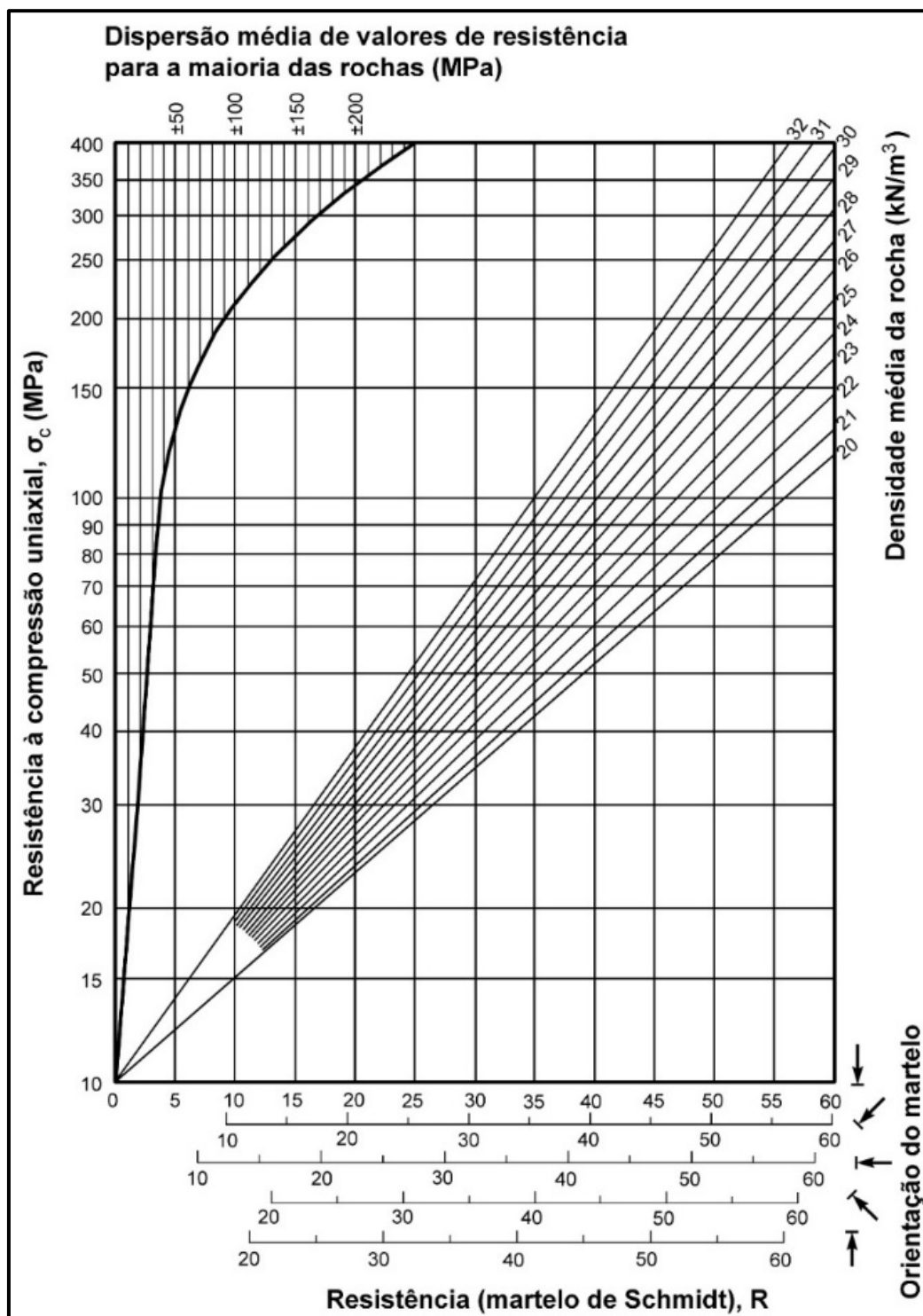
apresentou um quadro síntese onde demonstra o método de escavação e tipo de suporte mais apropriado em função do tipo de obra (Quadro 7).

**Quadro 6** - Classificação RMR - *Rock Mass Rating* (adaptado de Bieniawski, 1989).

| A. Parâmetros de classificação e seus pesos                                |   |  |   |   |  |   |   |       |    |
|--|---|--|---|---|--|---|---|-------|----|
| Parâmetro  |   |  | Intervalo de variação de valores                                      |   |  |   |   |       |    |
| P1   | Resistência do material rochoso intacto | Point-load Test, PLT (MPa)                             | >10   | 4 – 10  | 2 – 4  | 1 – 2   | Para este intervalo é aconselhável utilizar o ensaio de Resistência à compressão uniaxial |       |    |
|  |   | Res. Comp. Uniaxial , UCS (MPa)                        | >250  | 100 – 250   | 50 – 100   | 25 – 50   | 4 – 25  | 1 – 4 | <1 |
|  | Peso                                    |  | 15  | 12  | 7  | 4   | 2   | 1     | 0  |
| P2   | RQD (%)                                 |  | 90 - 100  | 75 - 90   | 50 – 75  | 25 - 50   | <25   |       |    |
|  | Peso                                    |  | 20  | 17  | 13   | 8   | 3   |       |    |
| P3   | Espaçamento das descontinuidades (m)    |  | >2  | 0,6 – 2   | 0,2 – 0,6  | 0,06 – 0,2  | <0,06   |       |    |
|  | Peso                                    |  | 20  | 15  | 10   | 8   | 5   |       |    |
| P4   | Condições das descontinuidades (Ver E)  |  | Superfícies muito rugosas, pouco contínuas, fechadas e não alteradas. | Superfícies ligeiramente rugosas, abertura <1mm e ligeiramente alteradas. | Superfícies ligeiramente rugosas, abertura <1mm e muito alteradas. | Superfícies lisas ou enchimento com espessura <5mm ou abertura 1 – 5mm contínuas. | Superfícies com enchimento mole com espessura >5mm ou abertura >5mm, contínuas.           |       |    |
|  | Peso                                    |  | 30  | 25  | 20   | 10  | 0   |       |    |
| P5   | Águas subterrâneas                      | Caudal por 10m de túnel (l/m)                          | Nenhum  | < 10  | 10 - 25  | 25 – 125  | >125  |       |    |
|  |   | Pressão de água nas diáclases/ tensão principal máxima | 0   | < 0,1   | 0,1 – 0,2  | 0,2 – 0,5   | > 0,5   |       |    |
|  |   | Condições gerais                                       | Completamente Seco  | Ligeiramente Húmido   | Húmido   | Gotejante   | Fluxo   |       |    |
|  | Peso                                    |  | 15  | 10  | 7  | 4   | 0   |       |    |
| B. Ajuste dos pesos devido à orientação das descontinuidades (Ver F)       |   |  |   |   |  |   |   |       |    |
| P6   |   |  | Muito favorável   | Favorável   | Razoável   | Desfavorável  | Muito desfavorável  |       |    |
|  | Túneis e minas                          |  | 0   | -2  | -5   | -10   | -12   |       |    |
|  | Fundações                               |  | 0   | -2  | -7   | -15   | -25   |       |    |
|  | Taludes                                 |  | 0   | -5  | -25  | -50   | -60   |       |    |
| C. Classe do maciço rochoso determinado através da soma dos pesos parciais |   |  |   |   |  |   |   |       |    |
| Peso   |   |  | 100-81  | 80-61   | 60-41  | 40-21   | <21   |       |    |
| Número da classe   |   |  | I   | II  | III  | IV  | V   |       |    |
| Descrição  |   |  | Rocha de muito boa qualidade  | Rocha de boa qualidade  | Rocha de qualidade razoável  | Rocha de má qualidade   | Rocha de muito má qualidade   |       |    |

**Quadro 6 – (Continuação).**

| D. Significado da classe da rocha  |   |                           |  |                               |                               |
|--|---|---------------------------|--|-------------------------------|-------------------------------|
| Número da classe   | I   | II                        | III  | IV                            | V                             |
| Tempo médio da auto-sustentação  | 20 anos para um vão de 15 m                       | 1 ano para um vão de 10 m | 1 semana para um vão de 5 m                | 10 horas para um vão de 2,5 m | 30 minutos para um vão de 1 m |
| Coesão do maciço rochoso (kPa)   | >400  | 300-400                   | 200-300                                    | 100-200                       | <100                          |
| Ângulo de atrito do maciço rochoso (°)                                       | >45   | 35-45                     | 25-35                                      | 15-25                         | <15                           |
| E. Orientações para a classificação das condições das descontinuidades       |   |                           |  |                               |                               |
| Comprimento (Persistência) (m)   | <1  | 1-3                       | 3-10                                       | 10-20                         | >20                           |
| Peso   | 6   | 4                         | 2  | 1                             | 0                             |
| Abertura (mm)  | Nenhuma   | <0,1                      | 0,1-1,0                                    | 1-5                           | >5                            |
| Peso   | 6   | 5                         | 4  | 1                             | 0                             |
| Rugosidade   | Muito rugosa                                      | Rugosa                    | Ligeirament e rugosa                       | Macio                         | Liso                          |
| Peso   | 6   | 5                         | 3  | 1                             | 0                             |
| Enchimento   | Nenhum  | Enchimento duro <5 mm     | Enchimento duro >5 mm                      | Enchiment o mole <5 mm        | Enchimento mole > 5mm         |
| Peso   | 6   | 4                         | 2  | 2                             | 0                             |
| Grau de alteração  | Inalterado  | Ligeirament e alterado    | Moderadam ente alterado                    | Muito alterado                | Decomposto                    |
| Peso   | 6   | 5                         | 3  | 1                             | 0                             |
| F. Efeito da orientação, direção e inclinação das descontinuidades em túneis |   |                           |  |                               |                               |
| Direção perpendicular ao eixo do túnel                                       |   |                           | Direção paralela ao eixo do túnel          |                               |                               |
| Escavar a favor da inclinação (Inclinação 45-90°)                            | Escavar a favor da inclinação (Inclinação 20-45°) |                           | Inclinação 45-90°                          |                               | Inclinação 20-45°             |
| Muito favorável  | Favorável   |                           | Muito desfavorável                         |                               | Razoável                      |
| Escavar contra a inclinação (Inclinação 45-90°)                              | Escavar contra a inclinação (Inclinação 20-45°)   |                           | Inclinação 0-20° (Independente da direção) |                               |                               |
| Razoável   | Desfavorável                                      |                           | Razoável                                   |                               |                               |



**Figura 20** - Ábaco de Miller para o cálculo da resistência à compressão da rocha partindo dos dados obtidos do *Martelo de Schmidt* (adaptado de Gonzalez de Vallejo & Ferrer, 2011).

**Quadro 7** – Análise da aplicação prática da classificação RMR por classes em contextos de escavação e sustimento subterrâneo (adaptado de Bieniawski, 1989).

| Classe                                 |   | I  | II  | III   | IV   | V  |
|--|---|--|---|---|--|--|
| Valor RMR                              |   | 100 - 81   | 80 - 61   | 60 - 41   | 40 - 21  | < 20   |
| Descrição da qualidade                 |   | Muito boa  | Boa   | Razoável  | Má   | Muito má   |
| Ângulo de atrito do Maciço             |   | > 45°  | 45° - 40°   | 40° - 35°   | 35° - 30°  | < 30°  |
| Período de estabilidade sem sustimento |   | 10 anos para um vão de 4 m   | 6 meses para um vão de 4 m  | 1 semana para um vão de 3 m   | 5 horas para um vão de 1,5 m   | 10 minutos para um vão de 0,5 m  |
| Escavação                              |   | Secção total, 3 m de avanço.                                       | Secção total, 1,0 a 1,5 m de avanço. Suporte completo a 20 m da frente                                    | Secção parcial (frente e baixo), avanço de 1,5 a 3,0 m. Início do suporte após cada desmonte. Suporte completo a 10 m | Secção parcial (frente e baixo) avanço de 1,0 a 1,5 m. Instalação do suporte concomitantemente com a escavação | Secções múltiplas avanço de 0,5 a 1,0 m. Instalação do suporte com a escavação. Betão projetado logo após o desmonte                   |
| Suporte                                | Pregagens (20 mm de diâmetro envolvidas em betão) | Geralmente não requer suporte, com exceção de pregagens ocasionais | Pregagens de 3 m de comprimento, espaçadas 2,5 m, ocasionalmente com malha de aço em certas zonas do teto | Pregagens sistemáticas com 4 m de comprimento, espaçadas 2 m nos hasteais e teto, com malha de aço no teto            | Pregagens sistemáticas com 4,5 m de comprimento, espaçadas de 1,0 a 1,5 m, com malha de aço no teto e hasteais | Pregagens sistemáticas com 5 a 6 m de comprimento, espaçadas de 1,0 a 1,5 m, com malha de aço no teto e hasteais. Pregagens na soleira |
|  | Betão projetado                                   |  | 50 mm no teto quando necessário   | 50 – 100 mm no teto; 30 mm nos hasteais   | 100 – 150 mm no teto; 100 mm nos hasteais.   | 150 – 200 mm no teto; 150 mm nos hasteais; 50 mm na soleira  |
|  | Cimbres   |  | Nenhum  | Nenhum  | Cimbres leves a médios espaçados de 1,5 m.   | Cimbres médios e pesados espaçados de 0,75 m. Fecho na soleira   |

### 2.3.3. SMR – “Slope Mass Rating”

Romana (1985, 1993, 1997) criou uma classificação que representa uma contribuição à RMR de Bieniawski (1989, 1993), na medida em que o conceito da classificação pode ser aplicado a taludes rochosos e não só a maciços rochosos subterrâneos.

O acréscimo à classificação RMR é designado como *Slope Mass Rating* – SMR, e obtém-se através da multiplicação de uma série de fatores de ajuste que dependem da relação geométrica existente entre as descontinuidades do talude rochoso, bem como a soma de um outro fator relativo ao método de escavação, e a adição de todos ao valor de RMR.

A expressão seguinte apresenta a forma de cálculo do valor de SMR:

$$SMR = RMR + (F_1 \times F_2 \times F_3) + F_4$$

Os fatores de correção que se apresentam na expressão são os seguintes:

- **F<sub>1</sub>** – Depende do **paralelismo entre a direção das descontinuidades e a face do talude rochoso**. Este fator varia entre 1,00 quando ambas as direções são paralelas e 0,15 quando o ângulo de atrito entre ambas as direções é maior que 30° e cuja probabilidade de rotura é muito baixa. O cálculo deste fator é ajustado em função da seguinte expressão, em que *aj* corresponde à direção das descontinuidades e *as* à direção do talude;

$$F_1 = [1 - (\text{sen } aj - as)]^2$$

- **F<sub>2</sub>** – Depende da **inclinação das descontinuidades numa rotura planar**. Pode variar entre 1,00 para as descontinuidades com inclinação superior a 45° e 0,15 para as descontinuidades com inclinação inferior a 20°. Quando a rotura presente é por tombamento este fator assume o valor de 1,00. A expressão que permite o ajuste deste fator é a seguinte, sendo *bj* a inclinação das descontinuidades;

$$F_2 = tg^2 \times bj$$

- **F<sub>3</sub>** – Resulta da **relação entre a inclinação do talude e das descontinuidades** existentes no mesmo, mantendo os valores apresentados na classificação RMR para o parâmetro P<sub>6</sub>, que relativamente a taludes pode variar entre -60 e 0;

- **F<sub>4</sub>** – Ajusta a expressão em função do **método de escavação** realizado no talude, podendo variar entre -8 para um desmonte com recurso a explosivos e 15 para um talude natural.

Sendo assim, os taludes podem agrupar-se em classes, segundo a sua estabilidade, como é demonstrado no Quadro 8.

**Quadro 8** – Classificação SMR (*Slope Mass Rating*) (adaptado de Romana, 1985).

| Classe |   | SMR      | Descrição | Estabilidade           | Roturas                                   | Tratamento           |
|--------|---|----------|-----------|------------------------|---|----------------------|
| I      | a | 91 - 100 | Muito boa | Completamente estável  | Nenhuma                                   | Nenhum               |
|        | b | 81 - 90  |           |                        |   |                      |
| II     | a | 71 - 80  | Boa       | Estável                | Alguns blocos                             | Ocasional            |
|        | b | 61 - 70  |           |                        |   |                      |
| III    | a | 51 - 60  | Razoável  | Parcialmente estável   | Algumas descontinuidades ou muitas cunhas | Sistemático          |
|        | b | 41 - 50  |           |                        |   |                      |
| IV     | a | 31 - 40  | Má        | Instável               | Descontinuidades ou cunhas importantes    | Importante/corretivo |
|        | b | 21 - 30  |           |                        |   |                      |
| V      | a | 11 - 20  | Muito má  | Completamente instável | Roturas planares importantes ou em massa  | Re-escavação         |
|        | b | 0 - 10   |           |                        |   |                      |



Na Figura 21 é possível perceber os tipos de rotura que podem ocorrer e a sua frequência, em função do valor de SMR obtido.

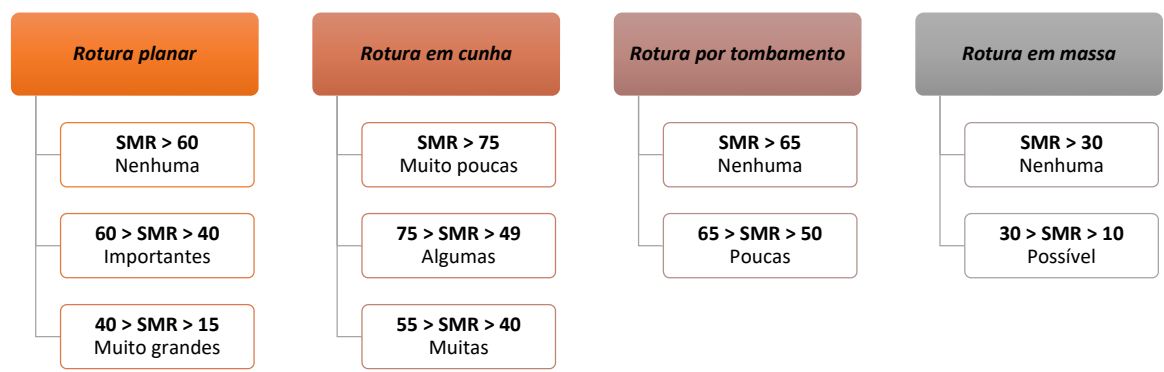


Figura 21 - Roturas prováveis de acordo com o SMR (adaptado de Romana, 1985, 1997).

Existem vários métodos de suporte obtidos segundo os valores de SMR, que devem ser posteriormente aplicados em função do zonamento determinado previamente (Figura 22).

| Roturas prováveis de acordo com os valores de SMR |   |    |    |    |                  |    |    |            |    |    |                  |         |                      |    |         |              |  |         |  |  |  |
|---|---|----|----|----|------------------|----|----|------------|----|----|------------------|---------|----------------------|----|---------|--------------|--|---------|--|--|--|
| Rotura planar                                     |   |    |    |    | Muito importante |    |    | Importante |    |    |                  | Nenhuma |                      |    |         |              |  |         |  |  |  |
| Rotura em cunha                                   |   |    |    |    |                  |    |    | Muitas     |    |    |                  | Algumas |                      |    |         | Muito poucas |  | Nenhuma |  |  |  |
| Tombamento  |   |    |    |    |                  |    |    | Importante |    |    | Pouco importante |         |                      |    | Nenhuma |              |  |         |  |  |  |
| Rotura em massa                                   |   |    |    |    | Possível         |    |    |            |    |    |                  |         |                      |    |         |              |  | Nenhuma |  |  |  |
| SMR   | 0   | 10 | 15 | 20 | 30               | 40 | 45 | 50         | 55 | 60 | 65               | 70      | 75                   | 80 | 90      | 100          |  |         |  |  |  |
| Re-escavação                                      | Muro de gravidade ancorado<br>Re-escavação  |    |    |    |                  |    |    |            |    |    |                  |         |                      |    |         |              |  |         |  |  |  |
| Drenagem  | Drenagem superficial<br>Drenagem profunda   |    |    |    |                  |    |    |            |    |    |                  |         |                      |    |         |              |  |         |  |  |  |
| Betão   | Betão projectados<br>Betão de reforço<br>Arcos e/ou vigas<br>Muro de pé de talude |    |    |    |                  |    |    |            |    |    |                  |         |                      |    |         |              |  |         |  |  |  |
| Reforço   | Pregagens<br>Ancoragens   |    |    |    |                  |    |    |            |    |    |                  |         |                      |    |         |              |  |         |  |  |  |
| Protecção   | Valetas<br>Rede metálica  |    |    |    |                  |    |    |            |    |    |                  |         |                      |    |         |              |  |         |  |  |  |
| Sem suporte                                       |   |    |    |    |                  |    |    |            |    |    |                  |         | Saneamento<br>Nenhum |    |         |              |  |         |  |  |  |
| Métodos de suporte sugeridos                      |   |    |    |    |                  |    |    |            |    |    |                  |         |                      |    |         |              |  |         |  |  |  |

Figura 22 - Métodos de suporte propostos para um determinado valor de SMR obtido (Romana, 1985, 1997).

A classificação SMR apresenta uma aplicabilidade direta e, como em outras classificações, a cada parâmetro a ser estudado corresponde um determinado peso. Mas como na generalidade dos métodos de classificação, é necessário ter um especial cuidado na interpretação de cada parâmetro e na sua extrapolação, pois pode levar a uma designação menos correta da classe da qualidade do talude rochoso, por isso, é importante ter um espírito crítico e interpretativo de quem aplica esta classificação.

### 2.3.4. GSI – “Geological Strength Index”

A resistência de um maciço rochoso pode ser determinada através de métodos empíricos (Hoek & Brown, 1980; Hoek et al., 2002; Hoek, 2007), mas devido à complexidade do maciço rochoso e do material rocha, é importante complementar o estudo da resistência com ensaios *in situ* e ensaios laboratoriais.

Hoek & Brown basearam-se em dados obtidos em experiências realizadas no material rocha e nos princípios básicos da mecânica das rochas e determinaram, para rochas intactas, com sustentação na teoria de Griffith, o designado *Crítério de Rotura de Hoek & Brown*, que se traduz pela seguinte expressão, em que  $\sigma'_1$  e  $\sigma'_3$ , respetivamente, são as tensões principais efetivas máxima e mínima na rotura e  $m_i$  é uma constante da rocha intacta:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_c \cdot (m_i \cdot \frac{\sigma'_3}{\sigma'_1} + 1)^{1/2}$$

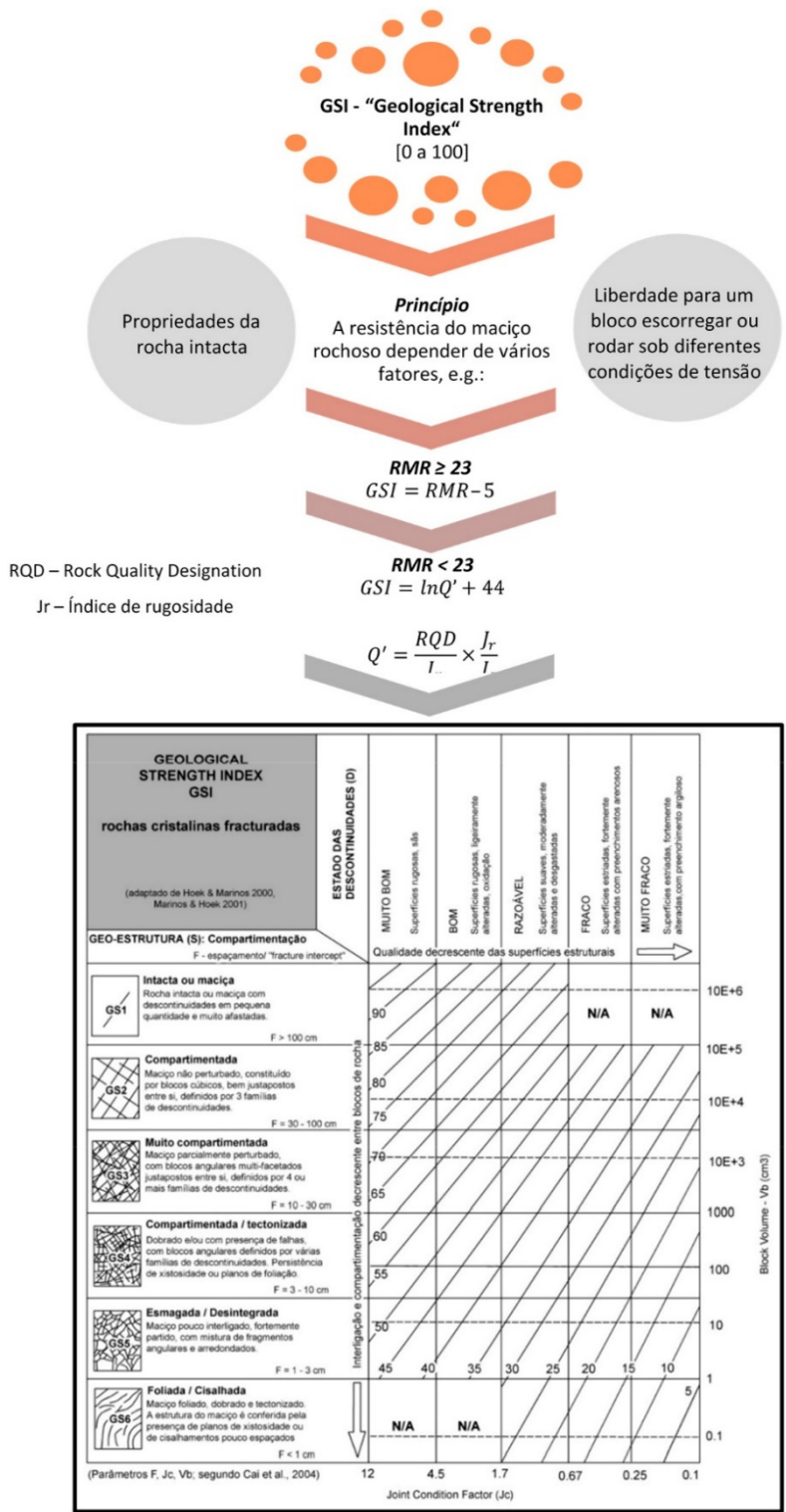
Sendo assim pode-se afirmar que a relação entre as tensões principais na rotura de determinada rocha é definida tendo em conta os parâmetros da resistência à compressão simples ( $\sigma_c$ ) e a constante da rocha ( $m_i$ ). Sempre que possível, os valores destas constantes devem ser determinados, através de uma análise estatística baseada em resultados de ensaios laboratoriais, mais concretamente, ensaios triaxiais guiados pelas recomendações da ISRM (2007). Os valores de  $m_i$  podem ser obtidos através do Quadro 9 proposto por Hoek (1994).

**Quadro 9** – Valores estimados do  $m_i$  (adaptado de Hoek, 2007).

| Tipo de rocha | Classe                      | Grupo       | Textura                   |                        |                        |              |
|---------------|-----------------------------|-------------|---------------------------|------------------------|------------------------|--------------|
|               |                             |             | Grosseira                 | Média                  | Fina                   | Muito fina   |
| Sedimentar    | Clástica                    |             | Conglomerado (22)         | Arenito (9)            | Siltito (9)            | Argilito (4) |
|               |                             |             | Grauvaque (18)            |                        |                        |              |
|               | Não clástica                | Orgânica    | Cré (18)<br>Carvão (8-21) |                        |                        |              |
|               |                             | Carbonatada | Brecha (20)               | Calcário compacto (10) | Calcário grosseiro (8) |              |
|               |                             | Química     |                           | Gesso (16)             | Anidrito (13)          |              |
| Metamórfica   | Não foliada                 |             | Mármore (9)               | Corneana (16)          | Quartzito (24)         |              |
|               | Ligeiramente foliada        |             | Migmatito (30)            | Anfibolito (31)        | Milonito (24)          |              |
|               | Foliada*                    |             | Gnaisse (33)              | Xisto (10)             | Filito (20)            | Ardósia (9)  |
| Ígnea         | Clara                       |             | Granito (33)              |                        | Riólito (16)           |              |
|               |                             |             | Granodiorito (30)         |                        | Dacito (17)            |              |
|               |                             |             | Diorito (28)              |                        | Andesito (19)          |              |
|               | Escura                      |             | Gabro (27)                | Dolerito (19)          | Basalto (17)           |              |
|               |                             |             | Norito (22)               |                        |                        |              |
|               | Tipo piroclástica extrusiva |             | Aglomerado (20)           | Brecha (18)            | Tufo (15)              |              |

i) os valores entre parênteses são estimados; ii) os valores assinalados com (\*) são para amostras de rocha ensaiadas numa direção normal à estratificação ou foliação; iii) os valores de  $m_i$  serão significativamente diferentes se ocorrer rotura ao longo de superfícies de baixa resistência.

Hoek et al. (1994, 2013) desenvolveu um índice geotécnico denominado por GSI (*Geological Strength Index*), que tem como objetivo determinar os parâmetros constantes da equação apresentada anteriormente. Assim, a Figura 23 apresenta o princípio em que o índice se baseia, como se realiza o seu cálculo, onde este depende do valor de RMR e da qualidade da rocha.



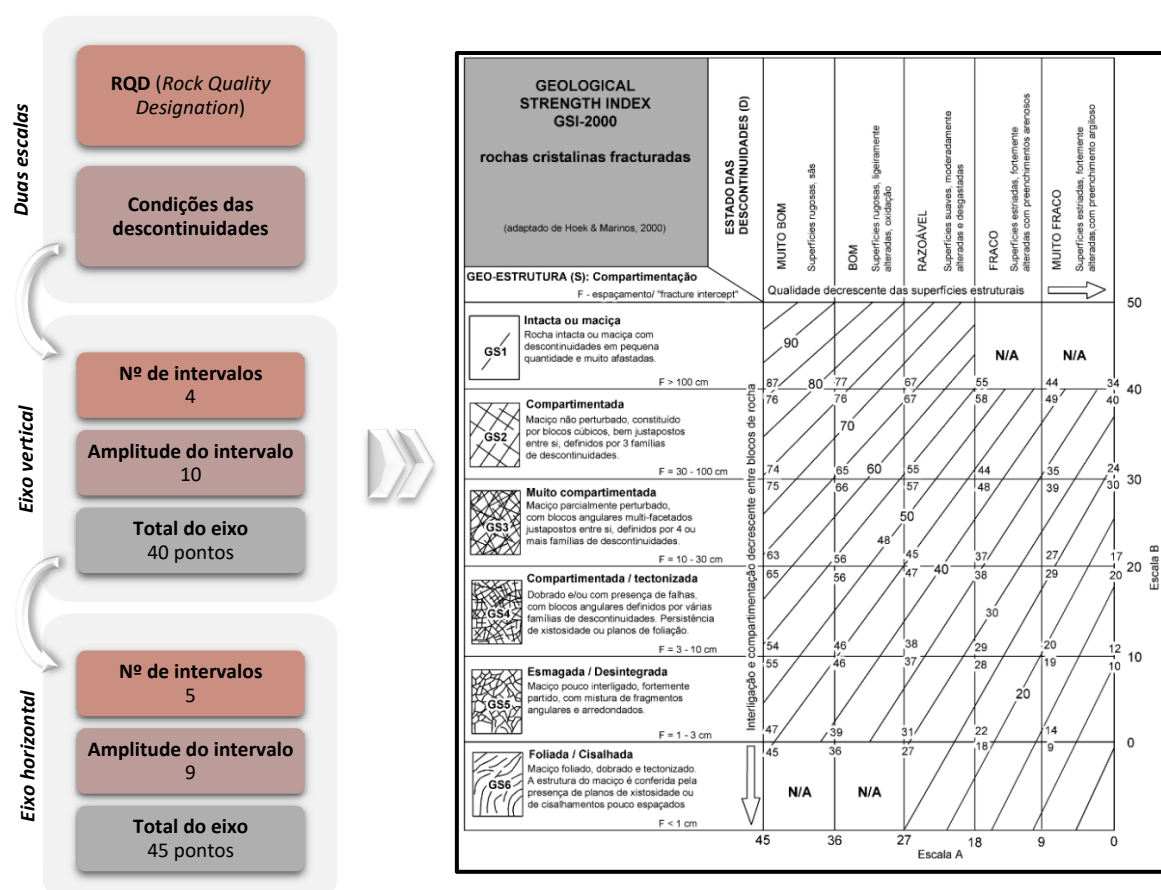
**Figura 23** - Breve explicação da determinação do GSI (adaptado de Hoek, 1994; Hoek & Marinos, 2000; Marinos & Hoek, 2001).

## GSI – VERSÃO 2013

Como em qualquer classificação pertencente à mecânica das rochas, o GSI também sofreu alterações ao longo do tempo, em função da sua aplicação prática, foram encontradas lacunas e/ou aspectos que poderiam ser melhorados para que a classificação ficasse cada vez mais completa.

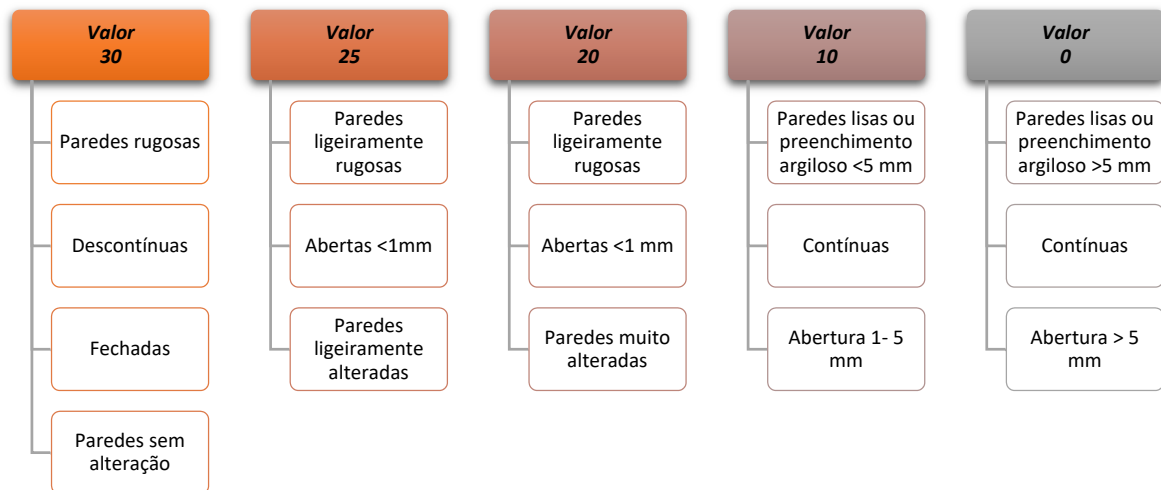
Hoek et al., (2013) publicaram um artigo onde é possível reter que a versão original do quadro de classificação foi desenvolvida a pensar na interpretação mais assertiva por parte dos geo-profissionais, algo que não era possível nas versões anteriores, que eram menos objetivas e que dependiam um pouco da capacidade de interpretar de cada profissional na frente de trabalho (Santa el al., 2016). Por isso, houve a necessidade de uniformizar e quantificar o ábaco original com base em parâmetros concretos de avaliação do maciço, o RQD (*Rock Quality Designation*) e o estado das descontinuidades.

Sendo assim, o ábaco referente à classificação GSI publicado por Hoek & Marinos (versão 2000) sofreu algumas alterações, como as apresentadas na Figura 24.



**Figura 24** - Alterações realizadas ao GSI (versão 2000) (adaptado de Hoek et al., 2013).

Para cada uma das escalas, horizontal e vertical, é definida e apresentada a distribuição dos intervalos de valores referidos, foi também necessário definir os parâmetros de atribuição de valores correspondentes a cada escala. No caso da escala horizontal o *Joint Condition* –  $J_{cond89}$  definido por Bieniawski (1989) demonstrado na Figura 25 e as respectivas descontinuidades são avaliadas segundo os parâmetros e pesos da classificação RMR (Quadro 10).



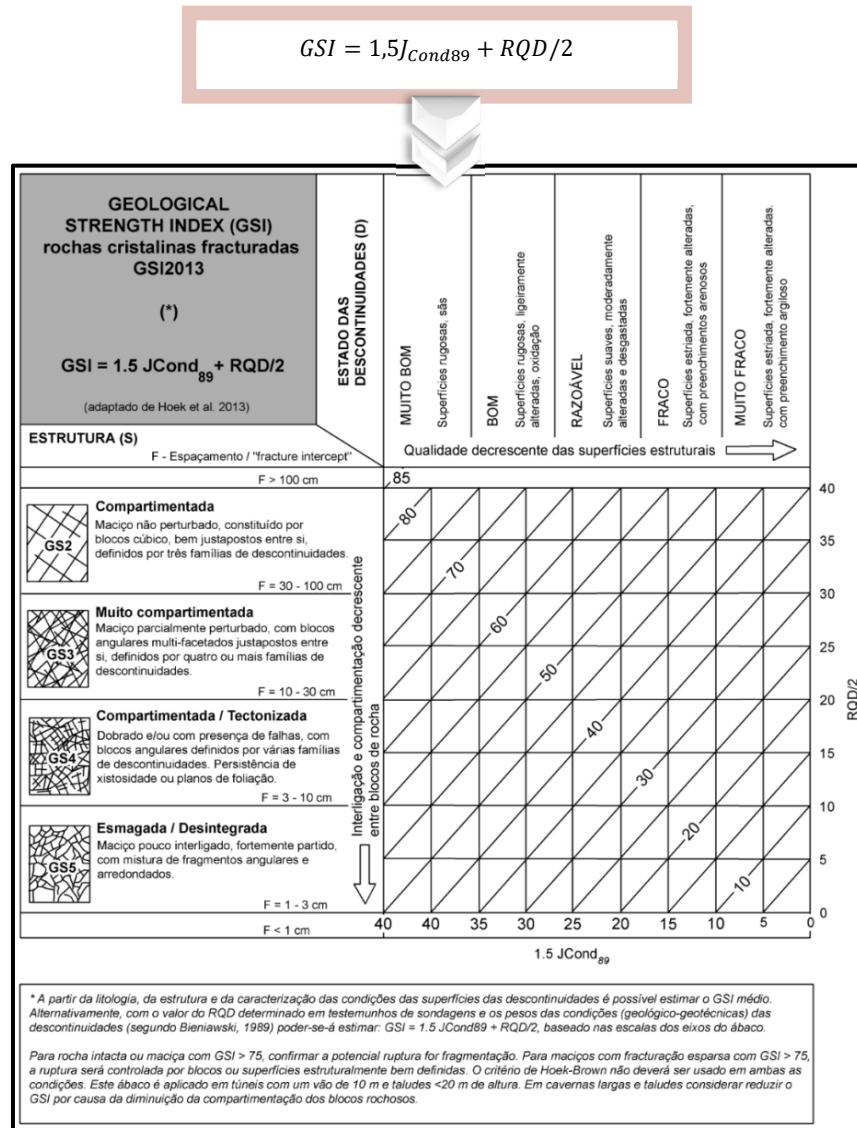
**Figura 25** - Classificação das características das descontinuidades (adaptado de Bieniawski, 1989).

**Quadro 10** – Descrição e respectivos pesos atribuídos às condições das descontinuidades na classificação RMR (adaptado de Bieniawski, 1989).

| E. Orientações para a classificação das condições das descontinuidades |              |                       |                        |                       |                       |
|--|--------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Comprimento (Persistência) (m)   | <1           | 1-3                   | 3-10                   | 10-20                 | >20                   |
| Peso   | 6            | 4                     | 2                      | 1                     | 0                     |
| Abertura (mm)  | Nenhuma      | <0,1                  | 0,1-1,0                | 1-5                   | >5                    |
| Peso   | 6            | 5                     | 4                      | 1                     | 0                     |
| Rugosidade   | Muito rugosa | Rugosa                | Ligeiramente rugosa    | Macio                 | Liso                  |
| Peso   | 6            | 5                     | 3                      | 1                     | 0                     |
| Enchimento   | Nenhum       | Enchimento duro <5 mm | Enchimento duro >5 mm  | Enchimento mole <5 mm | Enchimento mole > 5mm |
| Peso   | 6            | 4                     | 2                      | 2                     | 0                     |
| Grau de alteração  | Inalterado   | Ligeiramente alterado | Moderadamente alterado | Muito alterado        | Decomposto            |
| Peso   | 6            | 5                     | 3                      | 1                     | 0                     |

A escala vertical está relacionada com a compartimentação do maciço, onde se utilizada o RQD (Deere, 1963; Deere et al., 1967), estudado num ponto anterior.

De uma forma rápida pode afirmar-se que o valor de GSI (Hoek et al., 2013) é dado pela expressão apresentada na Figura 26, onde também se visualiza a classificação GSI (versão 2013) final com as escalas horizontal e vertical e a devida avaliação do maciço, podendo assim obter um valor único e não um intervalo de valores como acontecia na anterior classificação GSI.



**Figura 26** - Expressão para cálculo do GSI (versão 2013) e respetivo ábaco de quantificação (adaptado de Hoek et al., 2013).

---

## 2.4. Sistemas de classificação de maciços rochosos e nível de perigosidade geotécnica

### 2.4.1. Considerações iniciais

Na avaliação das condições de estabilidade de um talude rochoso as classificações geomecânicas apresentam um papel bastante importante. Por isso, até este ponto do projeto foram apresentadas classificações específicas para maciços rochosos, a RMR e GSI, e uma classificação mais direcionada para taludes rochosos, a SMR, associada ao RMR.

Neste ponto em específico, serão apresentadas classificações mais particulares para casos de taludes rochosos à superfície e a respetiva avaliação do seu nível de perigosidade, sendo assim, podem ser: a *Rockfall Hard Rating System* de Pierson et al., 1990 [RHRSm2 (versão 2015), adaptada por Pinheiro et al., 2015] e a *Slope Quality Index* (SQI, de Pinheiro et al., 2015).

A grande dificuldade na previsão do risco associado aos taludes conduziu a comunidade científica à procura de novas metodologias para a determinação e identificação dos riscos com a finalidade de os minimizar e controlar. Segundo o relatório do *Washington State Department of Transportation* (2010), relativo ao programa que realiza o controlo dos taludes com instabilidade, sendo este fenómeno considerado um perigo natural que abrange um movimento de uma massa rochosa, ou de solo, sob a influência direta da gravidade, ocorrendo grande parte deste fenómeno por ação direta antrópica, mas também devido a causas naturais.

Na fase de projeto, para avaliar estes fenómenos, existem várias metodologias que permitem quantificar e gerir de forma mais exata o risco associado a determinado fenómeno, como por exemplo, a utilização de métodos probabilísticos para saber as incertezas de cada abordagem.

Assim, no decorrer deste ponto serão abordadas as duas classificações para posterior aplicação no caso de estudo da escarpa de S. Cristóvão (Cinfães).

## 2.4.2. Rockfall Hazard Rating System (RHRSm2)

Para se avaliar os taludes rochosos deve-se ter em conta diversos fatores, sendo que estes vão influenciar diretamente a estabilidade ou instabilidade dos mesmos. Considerando propostas das Estradas de Portugal e do Roteiro para Avaliação de Estabilidade de Rochas e Maciços Rochosos, desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas no Brasil e por Gao et al., (2011), foram definidos os parâmetros necessários para avaliar de forma fiável os taludes de escavação em rocha (Pinheiro et al., 2015). Assim, na Figura 27 pode-se visualizar os principais fatores e os respectivos parâmetros a serem avaliados.



**Figura 27** - Identificação dos fatores e parâmetros em avaliação na proposta para o índice de qualidade (adaptado de Pinheiro et al., 2015).

Este método permite a cotação parcial de cada um dos fatores, de modo a permitir uma percepção rápida e funcional dos taludes em termos mecânicos e definir quais apresentam maior e menor risco, podendo assim, intervir atempadamente. A metodologia consiste em definir, no máximo, 5 intervalos, com a respetiva ponderação que pode variar entre 1 e 5.

Na avaliação do fator geológico utiliza-se os sistemas de classificação de maciços rochosos, mais concretamente o RMR - *Rock Mass Rating* (Bieniawski, 1989), SMR – *Slope Mass Rating* (Romana, 1985) e Q – *System* (Barton et al., 1974). Para avaliar o potencial de queda de blocos é utilizado o *Rockfall Hazard Rating System* – RHRS, tendo sido posteriormente alvo de pequenas modificações.

Pierson et al. (1990) criou no departamento de transporte de Oregon (USA), um método de classificação do risco específico associado à queda de blocos em taludes, o *Rockfall Hazard Rating System* (RHRS). Este método inclui um total de 8 categorias que são cotadas através de uma escala



exponencial que varia desde 3 até 81, sendo que um talude com maior risco de queda de blocos apresenta uma cotação superior a um talude com menor risco de queda de blocos (Pinheiro et al., 2015). Budetta (2004) realizou um inventário preliminar e após isso apresentou algumas modificações a este sistema de classificação, adicionando dessa forma duas novas categorias, posteriormente esta denomina-se de RHRSm, com um total de 10 categorias.

Em Budetta (2004) deparou-se com a necessidade de aplicar este sistema em diferentes ambientes geológicos para uma melhor validação do método. De acordo com Pina (2008), o RHRSm apresenta algumas limitações, sendo feita referência ao facto de algumas atribuições de valores serem realizados de forma subjetiva e outras de forma direta para que se enquadrem na categoria, ou seja, para o mesmo autor, nesta classificação está bastante presente a subjetividade e a interpretação de quem a utiliza.

Devido ao facto de as condições geotécnicas e ambientais serem diferentes nos diversos países, houve a necessidade de realizar algumas alterações ao RHRSm proposto por Budetta (2004), adaptando-o às condições específicas das autoestradas, designando-se assim um novo sistema por RHRSm2 (Quadro 11).

**Quadro 11** – Sistemas de classificação RHRSm2 (adaptado de Pinheiro et al., 2015).

| Categoria                         | Critério por pontos                       |   |  |  |
|-----------------------------------|---|---|--|--|
|                                   | 3   | 9   | 27   | 81   |
| Altura do talude (m)              | 7,5                                       | 7,5 – 22,5                                | 22,5 – 30                                    | > 30   |
| Inclinação (°)                    | < 30                                      | 30 - 40                                   | 40 – 50                                      | > 50   |
| Largura das banquetas (m)         | > 4                                       | 2 - 3                                     | < 1  | ---  |
| Eficácia da valeta de plataforma  | Boa retenção                              | Moderada retenção                         | Retenção limitada                            | Retenção muito limitada                                      |
| Zona de influência                | Longe                                     | Média                                     | Perto  | Muito perto  |
| Largura da plataforma (m)         | 21,5                                      | 15,5                                      | 9,5  | 3,5  |
| Condição estrutural               | Descontinuidades com orientação favorável | Descontinuidades com orientação aleatória | Descontinuidades com orientação desfavorável | Descontinuidades muito contínuas com orientação desfavorável |
| Alteração do maciço               | W1  | W2 – W3                                   | W3 – W4                                      | W5   |
| Erosão                            | Pequena                                   | Moderada retenção                         | Elevada                                      | Extrema  |
| Tamanho dos blocos (m)            | 0,3                                       | 0,6                                       | 0,9  | 1,2  |
| Volume dos blocos por evento (m³) | 2,3                                       | 4,6                                       | 6,9  | 9,3  |
| Quantidade dos blocos             | Nenhuns                                   | Poucos                                    | Alguns                                       | Muitos   |
| Irregularidade da face            | Baixa                                     | Média                                     | Alta   | Muito alta   |
| Presença de água                  | Seco                                      | Húmido                                    | Gotejante                                    | Fluído   |
| Historial de queda de blocos      | Poucas quedas                             | Quedas ocasionais                         | Muitas quedas                                | Quedas constantes  |
| AVR                               | 1/10 anos                                 | 3/ano                                     | 6/ano  | 9/ano  |
|                                   | 25%                                       | 50%                                       | 75%  | 100%   |
| Distância de decisão              | Adequada                                  | Moderada                                  | Limitada                                     | Muito limitada   |
|                                   | 100%                                      | 80%                                       | 60%  | 40%  |
| Clima                             | Baixa precipitação                        | Moderada precipitação                     | Alta precipitação                            | ---  |
|                                   | < 1000                                    | 1000 – 2000                               | > 2000                                       | ---  |

Como em todas as classificações para a interpretação do valor final existem tabelas, sendo neste caso específico a avaliação do risco da queda de blocos. O sistema inicial só apresentava 3 níveis de risco, o baixo, médio e elevado, mas para facilitar a sua integração na metodologia geral do índice de qualidade, foi necessário criar mais 2 níveis, passando a ter uma tabela com 5 intervalos de risco, como se pode ver no Quadro 12.

**Quadro 12** - Resumo da classificação do sistema RHRSm2 e respetiva conversão para o índice geral do talude (adaptado de Pierson et al., 1990; Budetta, 2004).

| Classificação geral do talude |               |             | Índice geral |
|-------------------------------|---------------|-------------|--------------|
| Pontuação RHRS (adaptado)     | Grau de risco | Intervenção |              |
| < 54                          | Muito baixo   | ---         | 1            |
| 54 - 162                      | Baixo         | Médio prazo | 2            |
| 163 - 324                     | Médio         | Curto prazo | 3            |
| 325 - 486                     | Elevado       | Urgente     | 4            |
| > 487                         | Muito elevado | Imediata    | 5            |

As novas categorias adicionadas têm como objetivo completar o conceito final do sistema RHRSm e avaliam o demonstrado na Figura 28 (Budetta, 2004; Pinheiro et al., 2015).

|                                    |   |
|------------------------------------|---|
| <b>Inclinação do talude</b>        | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Relevante para o desenvolvimento da queda dos blocos;</li> <li>• Quanto mais inclinado o talude, maior o risco da queda e, consequentemente, maior a velocidade do impacto do bloco na plataforma e o respetivo ressalto deste.</li> </ul> |
| <b>Zona de influência</b>          | <ul style="list-style-type: none"> <li>• A distância entre o pé do talude e a via de circulação mais próxima está ligado diretamente às consequências da queda de blocos;</li> <li>• Quanto maior a zona de influência, maior será o risco associado.</li> </ul>                    |
| <b>Quantidade de blocos soltos</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Quanto maior o número de blocos soltos, maior a probabilidade de acidentes. Este parâmetro está diretamente ligado à instabilidade e risco da queda de blocos.</li> </ul>  |
| <b>Clima</b>                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Elevadas precipitações podem criar instabilidade nos taludes e aumentar a probabilidade da queda de blocos.</li> </ul>   |
| <b>Largura da plataforma</b>       | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Deve ser ajustada segundo o sistema RHRSm.</li> </ul>  |
| <b>Largura das banquetas</b>       | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Novo parâmetro incluído tendo em conta que quanto maior a sua largura, maior a sua capacidade de retenção.</li> </ul>  |

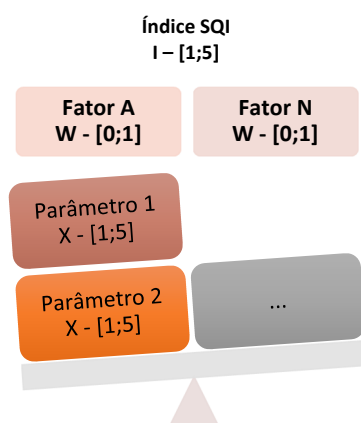
**Figura 28** - Novas categorias adicionadas ao RHRSm e a respetiva avaliação (Budetta, 2004; Pinheiro et al., 2015).

### 2.4.3. Slope Quality Index (SQI)

Na sequência do sistema anterior RHRS – *Rockfall Hazard Rating System* criado por Pierson et al. (1990), surge a classificação SQI, esta vai responder globalmente às necessidades e opções de carácter estratégico das empresas concessionárias de infraestruturas que lidam com taludes rochosos a fim de avaliar os mesmos e prever possíveis comportamentos mecânicos, visando assim a segurança de todos os utilizadores.

O sistema SQI – *Slope Quality Index* proposto por Pinheiro et al. (2015), baseia-se no sistema empírico realizado por Liu & Chen (2007), onde a finalidade é integrar fatores que de alguma forma estão ligados à estabilidade de taludes, isto é, afetam direta ou indiretamente o seu comportamento mecânico.

O SQI (Pinheiro et al., 2015) tem como objetivo determinar um índice de qualidade final, a sua cotação pode variar entre 1 e 5, como se pode perceber pela Figura 29, esta representa muito boa ou muito má condição do talude, respetivamente (Quadro 13).



**Figura 29** - Metodologia para obtenção do SQI (adaptado de Pinheiro et al., 2015).

**Quadro 13** - Classificação quantitativa e qualitativa do talude bem como o seu grau de risco associado em função do valor de SQI (Pinheiro et al., 2015).

| SQI       | Estado do talude | Grau de risco |
|-----------|------------------|---------------|
| 1 – 1,4   | Muito bom        | Muito baixo   |
| 1,5 – 2,4 | Bom              | Baixo         |
| 2,5 – 3,4 | Médio            | Médio         |
| 3,5 – 4,2 | Mau              | Alto          |
| 4,3 – 5   | Muito mau        | Muito alto    |

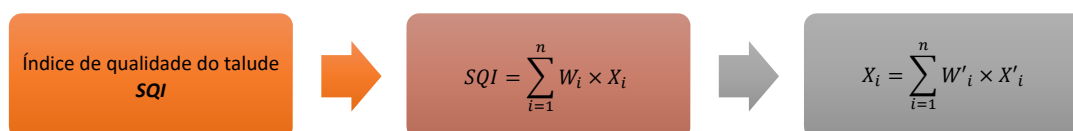
Para que seja possível determinar o índice de qualidade devem ser avaliados diversos parâmetros e cujas cotações atribuídas a cada um pode variar também entre 1 e 5. Os fatores que influenciam esta análise e avaliação de qualidade do talude já foram apresentados anteriormente na Figura 27,

onde é possível atribuir pesos de forma ponderada e conforme o grau de importância, como se pode ver no Quadro 14.

**Quadro 14** – Peso associado a cada fator para o cálculo do SQI (adaptado de Pinheiro et al., 2015).

| Fator               | Peso |
|---------------------|------|
| Geometria           | 0,17 |
| Geológico           | 0,14 |
| Sistema de drenagem | 0,11 |
| Inspeções           | 0,13 |
| Monitorização       | 0,11 |
| Imediações          | 0,09 |
| Historial           | 0,07 |
| Revestimento        | 0,10 |
| Ambiental/Tráfego   | 0,08 |

Sendo assim para determinar o valor do *Slope Quality Index* é necessário aplicar as expressões apresentadas na Figura 30.



$W_i$  – Peso calculado para cada um dos fatores;

$X_i$  – Cotação atribuída a cada um dos fatores (será maior quanto maior a importância do mesmo na análise da avaliação de risco);

$W'_i$  – Peso atribuído a cada parâmetro;

$X'_i$  – Cotação atribuída a cada parâmetro.

**Figura 30** - Cálculo do índice de qualidade do talude (SQI) (adaptado de Pinheiro et al., 2015).

Pinheiro et al. (2015), afirma que quando não existem valores de alguns parâmetros, deve-se assumir para o peso relativo o peso dos restantes fatores, fazendo uma atribuição de pesos de forma proporcional e por ordem de importância na avaliação do talude. Sendo assim, no Quadro 15 é apresentado o método de atribuição da classificação SQI.

Após efetuar o cálculo do SQI de Pinheiro et al. (2015), o valor numérico obtido deve ser comparado com o Quadro 13 que corresponde à avaliação do grau de risco SQI e, como acontece em classificações idênticas a esta, é necessário verificar em que intervalo se encaixa o valor obtido e analisar as respetivas conclusões para o talude em estudo, em termos de verificação do seu estado ou na sua avaliação de risco.

**Quadro 15** – Atribuição de fatores para o cálculo do SQI (adaptado de Pinheiro et al, 2015).

| Fatores                     | Parâmetros                                 |                               | Categorias e classificações |           |           |           |           |  |
|-----------------------------|--|-------------------------------|-----------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|--|
| Geométrico<br>0,17          | Altura do talude (m)<br>0,25               |                               | < 10                        | 10 – 20   | 20 - 30   | 30 – 40   | > 40      |  |
|                             | Peso                                       |                               | 1                           | 2         | 3         | 4         | 5         |  |
|                             | Inclinação do talude (°)<br>0,35           |                               | < 30                        | 30 - 40   | 41 – 50   | 51 – 60   | > 60      |  |
|                             | Peso                                       |                               | 1                           | 2         | 3         | 4         | 5         |  |
|                             | Ângulo de Banqueta (m)<br>0,15             |                               | Correto                     | Incorreto |           |           |           |  |
|                             | Peso                                       |                               | 1 - 2                       | 4 - 5     |           |           |           |  |
|                             | Largura de Banqueta (m)<br>0,25            |                               | 0 - 1                       | 1 - 2     | 2 – 3     | 3 – 4     | > 4       |  |
|                             | Peso                                       |                               | 5                           | 4         | 3         | 2         | 1         |  |
| Geológico<br>0,14           | Formação<br>0,5                            | Tipo<br>0,4                   | I                           | II        | III       | IV        | V         |  |
|                             |  | Grau de alteração (W)<br>0,3  | W1                          | W2        | W3        | W4        | W5        |  |
|                             |  | Peso                          | 1                           | 2         | 3         | 4         | 5         |  |
|                             |  | Falhas<br>0,3                 | Existe                      |           |           |           |           |  |
|                             |  | Peso                          | 4 - 5                       |           |           |           |           |  |
|                             | Blocos<br>0,2                              | RHRSm²                        | < 51                        | 51 - 153  | 153 - 333 | 333 – 459 | > 459     |  |
|                             |  | Peso                          | 1                           | 2         | 3         | 4         | 5         |  |
|                             | Sistema de classificação (apenas 1)<br>0,3 | Q<br>0,33                     | 40 - 1000                   | 10 - 40   | 4 – 10    | 1 - 4     | 0,001 - 1 |  |
|                             |  | Peso                          | 1                           | 2         | 3         | 4         | 5         |  |
|                             |  | RMR<br>0,34                   | 100 - 81                    | 80 - 61   | 60 - 41   | 40 - 21   | 20 - 0    |  |
|                             |  | Peso                          | 1                           | 2         | 3         | 4         | 5         |  |
|                             |  | SMR<br>0,33                   | 100 - 81                    | 80 - 61   | 60 - 41   | 40 - 21   | 20 - 0    |  |
|                             |  | Peso                          | 1                           | 2         | 3         | 4         | 5         |  |
| Sistema de drenagem<br>0,11 | Drenagem superficial<br>0,6                | Estado de conservação<br>0,35 | Muito bom                   | Bom       | Médio     | Mau       | Muito mau |  |
|                             |  | Peso                          | 1                           | 2         | 3         | 4         | 5         |  |
|                             |  | Estado de manutenção<br>0,45  | Bom                         | Médio     | Mau       |           |           |  |
|                             |  | Peso                          | 1                           | 2         | 3         |           |           |  |
|                             |  | Presença<br>0,2               | Sim                         | Não       |           |           |           |  |
|                             |  | Peso                          | 1 - 2                       | 4 - 5     |           |           |           |  |
|                             | Drenagem profunda<br>0,2                   | Presença<br>1                 | Sim                         | Não       |           |           |           |  |
|                             |  | Peso                          | 1 - 2                       | 4 - 5     |           |           |           |  |
|                             | Drenagem das banquetas<br>0,2              |                               | Sim                         | Não       |           |           |           |  |
|                             | Peso                                       |                               | 1 - 2                       | 4 - 5     |           |           |           |  |

Quadro 15 – (continuação).

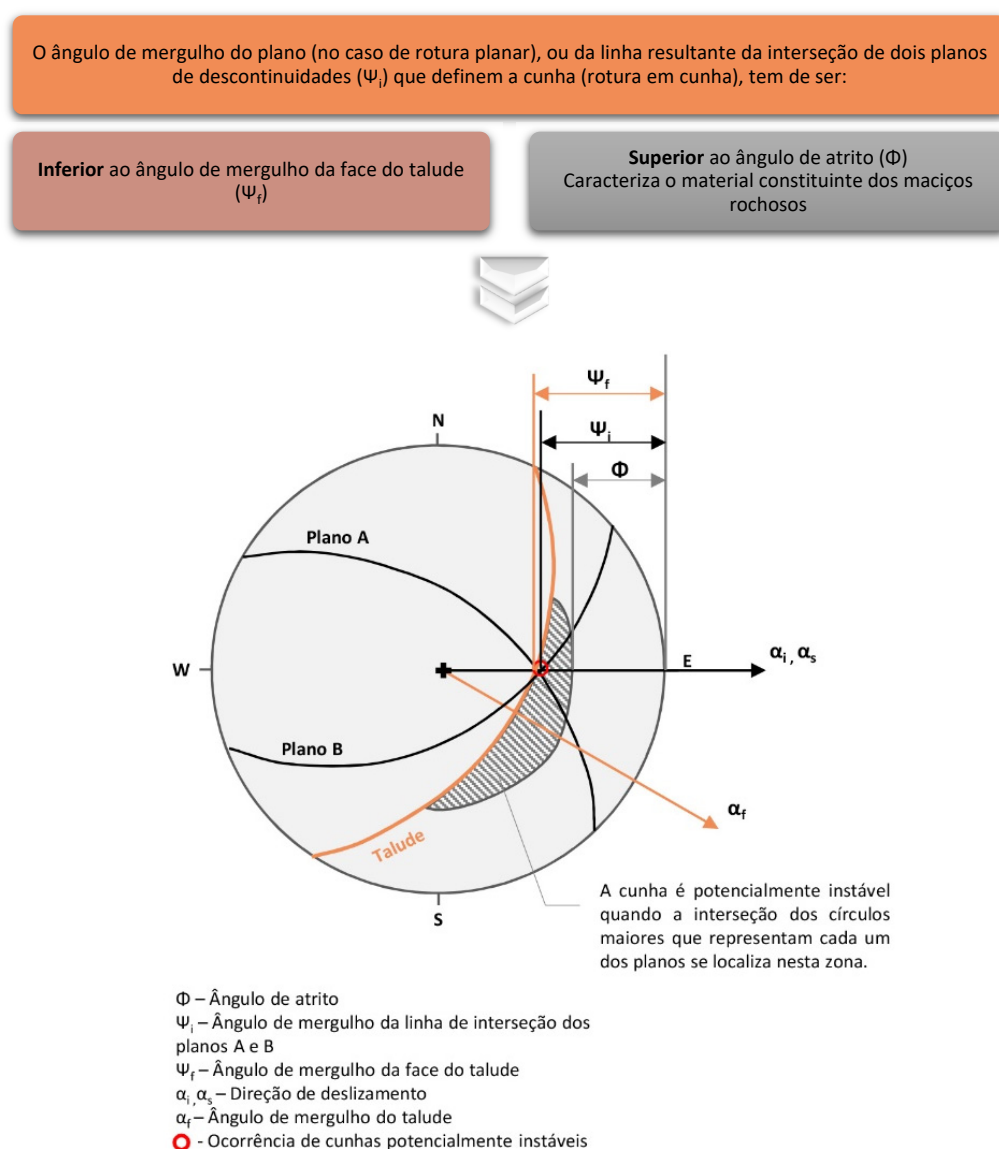
| Fatores                   | Parâmetros                           |                                 | Categorias e classificações |             |             |                     |              |
|---------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|-------------|-------------|---------------------|--------------|
| Inspeção visual<br>0,13   | Estado de conservação<br>0,6         | Classificação                   | Muito bom                   | Bom         | Médio       | Mau                 | Muito mau    |
|                           |                                      | Peso                            | 1                           | 2           | 3           | 4                   | 5            |
|                           | Estado de manutenção<br>0,4          | Classificação                   | Bom                         | Médio       | Mau         |                     |              |
|                           |                                      | Peso                            | 1                           | 2           | 3           |                     |              |
| Monitorização<br>0,11     | Células de carga<br>0,25             | Intervalos                      | 1                           | 2           | 3           | 4                   | 5            |
|                           |                                      |                                 | [0% - 20%[                  | [20% - 40%[ | [40% - 60%[ | [60% - 80%[         | [80% - 100%[ |
|                           |                                      | Peso                            | 1                           | 2           | 3           | 4                   | 5            |
|                           | Inclinómetros<br>0,25                | Intervalos                      | 1                           | 2           | 3           | 4                   | 5            |
|                           |                                      |                                 | [0% - 20%[                  | [20% - 40%[ | [40% - 60%[ | [60% - 80%[         | [80% - 100%[ |
|                           |                                      | Peso                            | 1                           | 2           | 3           | 4                   | 5            |
|                           | Piezómetros<br>0,25                  | Intervalos                      | 1                           | 2           | 3           | 4                   | 5            |
|                           |                                      |                                 | [0% - 20%[                  | [20% - 40%[ | [40% - 60%[ | [60% - 80%[         | [80% - 100%[ |
|                           |                                      | Peso                            | 1                           | 2           | 3           | 4                   | 5            |
|                           | Alvos topográficos<br>0,25           | Intervalos                      | 1                           | 2           | 3           | 4                   | 5            |
|                           |                                      |                                 | [0% - 20%[                  | [20% - 40%[ | [40% - 60%[ | [60% - 80%[         | [80% - 100%[ |
|                           |                                      | Peso                            | 1                           | 2           | 3           | 4                   | 5            |
| Historial<br>0,07         | Acidentes<br>0,7                     | Queda de blocos<br>0,25         | Nenhuma                     | Inativa     | Alguma      | Relativamente ativa | Muito ativa  |
|                           |                                      | Peso                            | 1                           | 2           | 3           | 4                   | 5            |
|                           |                                      | Deslizamento planar<br>0,25     | Nenhuma                     | Inativa     | Alguma      | Relativamente ativa | Muito ativa  |
|                           |                                      | Peso                            | 1                           | 2           | 3           | 4                   | 5            |
|                           |                                      | Cunha de rocha<br>0,25          | Nenhuma                     | Inativa     | Alguma      | Relativamente ativa | Muito ativa  |
|                           |                                      | Peso                            | 1                           | 2           | 3           | 4                   | 5            |
|                           |                                      | Diretriz circular<br>0,25       | Nenhuma                     | Inativa     | Alguma      | Relativamente ativa | Muito ativa  |
|                           |                                      | Peso                            | 1                           | 2           | 3           | 4                   | 5            |
|                           | Intervenções                         |                                 | Grau 3                      | Grau 2      | Grau 1      |                     |              |
|                           | Peso                                 |                                 | 1 - 2                       | 3           | 4 - 5       |                     |              |
| Ambiental/Tráfego<br>0,08 | Zona sísmica<br>0,3                  | Tipo 2<br>0,6                   | 2.1                         | 2.2         | 2.3         | 2.4                 | 2.5          |
|                           |                                      | Peso                            | 5                           | 4           | 3           | 2                   | 1            |
|                           |                                      | Tipo 1<br>0,4                   | 1.1                         | 1.2         | 1.3         | 1.4                 | 1.5 – 1.6    |
|                           |                                      | Peso                            | 5                           | 4           | 3           | 2                   | 1            |
|                           | Precipitação média anual (mm)<br>0,5 |                                 | < 100                       | 100 - 500   | 500 - 1000  | 1000 – 2000         | > 2000       |
|                           | Peso                                 |                                 | 1                           | 2           | 3           | 4                   | 5            |
|                           | Tráfego<br>0,2                       | Velocidade máxima (km/h)<br>0,5 | 50 - 60                     | 60 - 70     | 70 - 90     | 90 - 100            | 100 - 120    |
|                           |                                      | Peso                            | 1                           | 2           | 3           | 4                   | 5            |
|                           |                                      | Tráfego médio (TMD)<br>0,2      | < 1800                      | 1800 - 1900 | 1900 - 2000 | 2000 – 2200         | > 2200       |
|                           |                                      | Peso                            | 1                           | 2           | 3           | 4                   | 5            |
| Proteção<br>0,1           | Proteção superficial<br>0,8          |                                 | < 25%                       | [25% - 50%[ | 50%         | ]50% - 75%]         | ]75% - 100%] |
|                           | Peso                                 |                                 | 5                           | 4           | 3           | 2                   | 1            |
|                           | Cobertura vegetal<br>0,2             |                                 | Não existe                  | Pontual     | Uniforme    |                     |              |
|                           | Peso                                 |                                 | 5                           | 4 - 5       | 1 - 2       |                     |              |
| Imediações<br>0,09        | Sobrecarga<br>0,6                    |                                 | Sim                         | Não         |             |                     |              |
|                           | Peso                                 |                                 | 5                           | 1           |             |                     |              |
|                           | Vibrações nas proximidades<br>0,4    |                                 | Sim                         | Não         |             |                     |              |
|                           | Peso                                 |                                 | 5                           | 1           |             |                     |              |

## 2.5. Avaliação da estabilidade de taludes rochosos

### 2.5.1. Teste de Markland

Na avaliação da estabilidade de taludes pode-se utilizar os índices demonstrados anteriormente, mas também é possível usar um teste criado por Markland (1972) e Hocking (1976) designado por *Teste de Markland* (Wyllie & Mah, 2004). Este avalia as possíveis roturas em cunha ou planares.

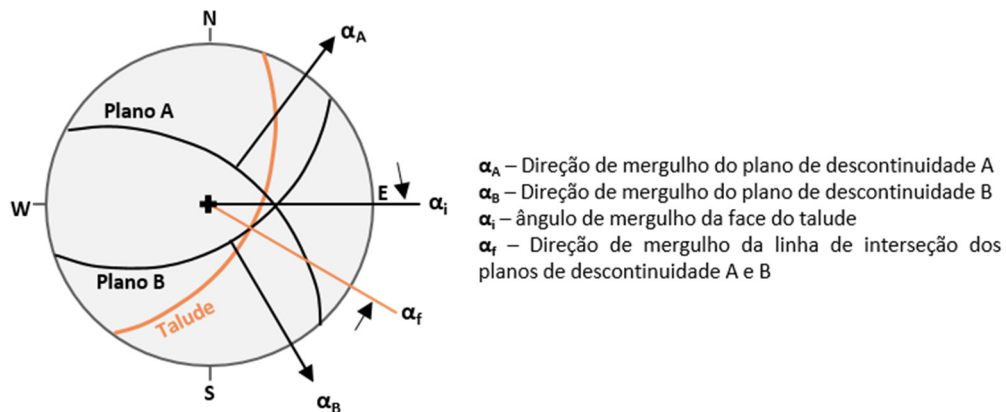
Para que aconteça este tipo de roturas é necessário reunir algumas condições como as demonstradas na Figura 31. Quando estas condições se verificam simultaneamente, então, pode ocorrer uma rotura em cunha. Mas em contrapartida, a existência de uma só condição não é o suficiente para originar este tipo de rotura. Na mesma figura é possível observar a aplicação do *Teste de Markland*.



**Figura 31** - Condições para ocorrer uma rotura em cunha e exemplo de aplicação do teste de Markland (adaptado de Wyllie & Mah, 2004).

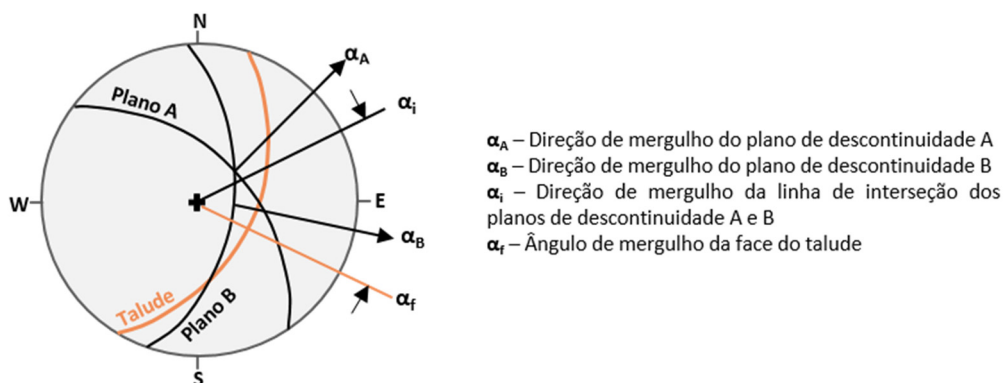
O *Teste de Markland* permite avaliar o processo do escorregamento de dois planos de descontinuidade. Sendo assim é possível ocorrer duas situações:

- Se a direção do mergulho de ambos os planos de descontinuidade estiver fora do intervalo compreendido entre a direção de mergulho da linha da interseção de ambos os planos ( $\alpha_i$ ) e a direção de mergulho da face do talude ( $\alpha_f$ ), o escorregamento verifica-se ao longo dos dois planos de descontinuidades, como se pode ver na Figura 32 com a aplicação do *Teste de Markland*;



**Figura 32** - Exemplo de escorregamento de uma cunha originada pelo contacto entre dois planos de descontinuidade (adaptado de Wyllie & Mah, 2004).

- Se algum dos planos de descontinuidade apresentarem uma direção de mergulho que esteja compreendida no intervalo referido anteriormente, o escorregamento apenas se verifica ao longo desse mesmo plano, como se pode visualizar no *Teste de Markland* representado na Figura 33.



**Figura 33** - Exemplo de escorregamento de uma cunha provocada pelo contacto de apenas um plano de descontinuidade (adaptado de Wyllie & Mah, 2004).



### 2.5.2. Modelação geotécnica: *RocFall* e *Swedge*

Para o estudo da estabilidade dos taludes rochosos podem ser utilizados dois programas desenvolvidos pela empresa *Rocscience*, mais concretamente o *Swedge* e o *RocFall*. O primeiro permite avaliar a geometria e a estabilidade de cunhas superficiais em taludes rochosos e o segundo permite simular a trajetória de possíveis blocos instáveis de um dado talude rochoso.

#### → *Swedge*

Como já foi referido, este programa permite avaliar a geometria e a estabilidade de cunhas superficiais em taludes rochosos. Estas são definidas pela interseção de dois ou mais planos de descontinuidade, pelo topo e pelo plano da escarpa. Há ainda a possibilidade de definir uma fenda de tração (Figura 34).

É importante referir que este programa permite enviar as atitudes das descontinuidades provenientes do cálculo realizado com programa da mesma empresa, *Dips*, onde é possível obter projeções estereográficas de diferentes planos de descontinuidade. Relativamente ao estudo das descontinuidades, devem ser estudadas as respetivas atitudes geológicas, mas também a coesão, ângulo de atrito e rugosidade. Já para a modelação do comportamento ao corte destas descontinuidades, existem diversos modelos, como, por exemplo, o de *Mohr-Coulomb*.

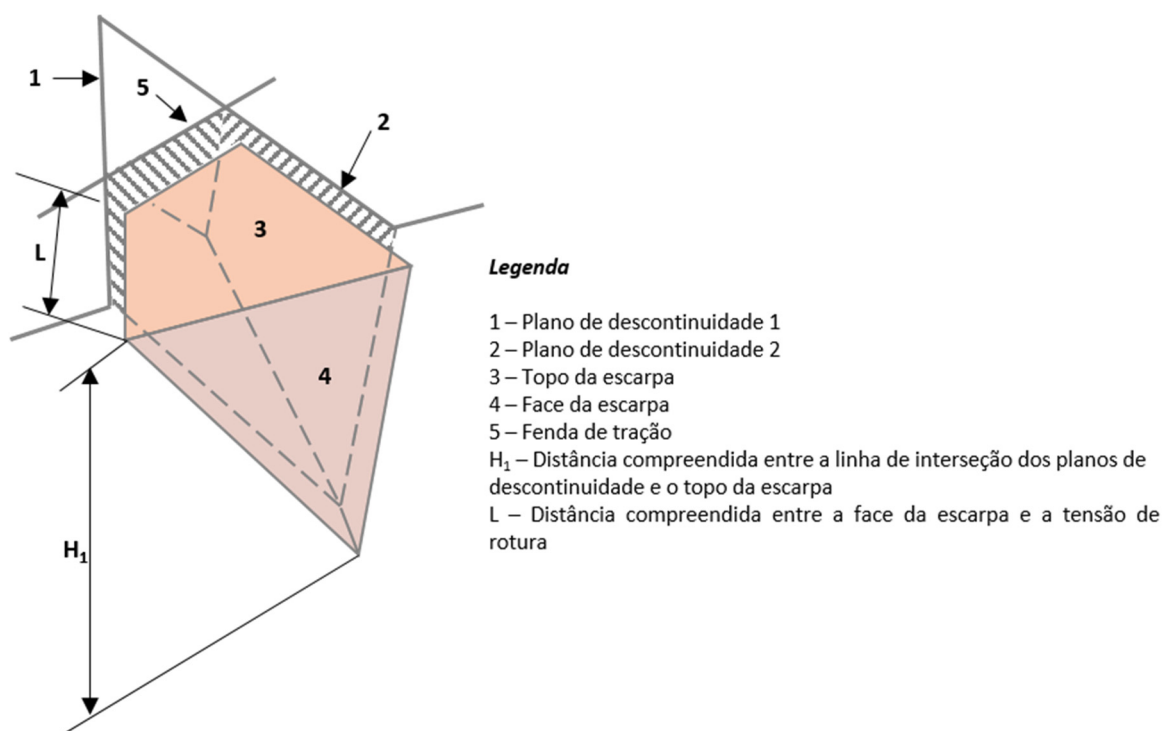
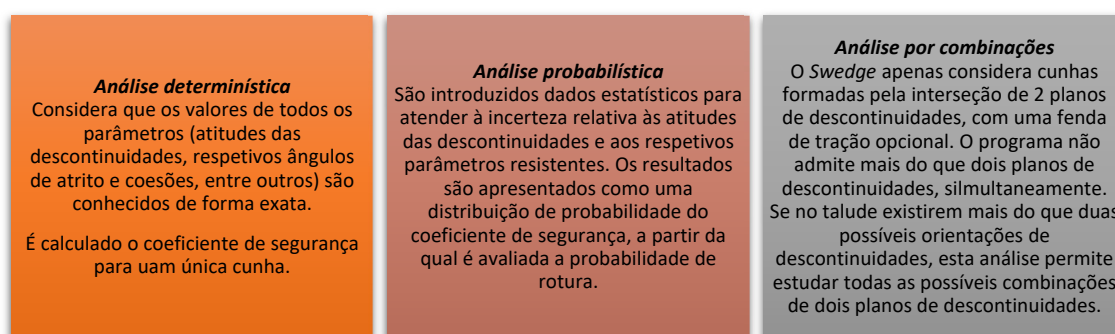


Figura 34 - Características de uma rotura em cunha (adaptado de <http://www.rocscience.com/>).

Este programa disponibiliza um conjunto alargado de opções de análise, destacando-se a análise determinística, a probabilística e a de combinações (Figura 35).



**Figura 35** - Tipos de análise disponíveis no Swedge (adaptado de Rocscience - <http://www.rocscience.com/>).

Independentemente do tipo de análise, o *Swedge* disponibiliza informações relevantes da cunha em estudo como o peso, o volume, as orientações dos planos de descontinuidade e a projeção estereográfica. Este programa também permite exportar essas informações num relatório detalhado, de modo a caracterizar de forma apropriada a cunha.

Um outro aspeto positivo deste programa é a possibilidade de avaliação do efeito da aplicação de pregagens, betão projetado, ou de forças ou pressões exteriores.

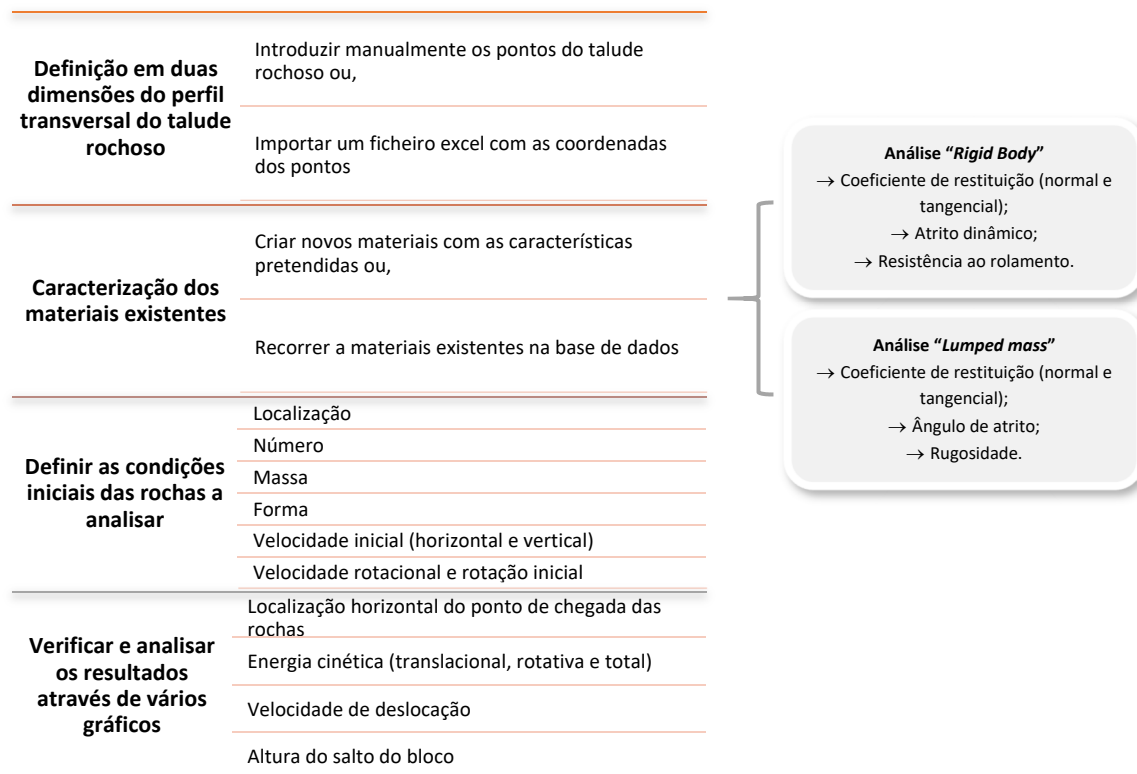
Também podem ser modeladas as forças desestabilizadoras que resultam da pressão da água, de ações sísmicas ou de outras forças externas.

#### → **RocFall**

Como referido anteriormente este programa é de cálculo automático permite estudar taludes rochosos com blocos potencialmente instáveis, através de uma análise estatística.

O *RocFall* tem dois métodos de análise disponíveis – “*Lumped Mass or Rigid Body*”. Por defeito, o método usado é o “*Lumped Mass*”, neste os blocos rochosos são modelados como pontos com uma determinada massa e sem dimensão física. A metodologia “*Rigid Body*”, pelo contrário, permite definir a forma dos blocos rochosos.

A modelação é realizada seguindo os passos demonstrados na Figura 36.



**Figura 36** - Modo de funcionamento do programa *RocFall* (Rocscience - <http://www.rocscience.com/>).

Este programa apresenta diversas vantagens desde a visualização simultânea dos gráficos que são gerados automaticamente, podendo assim realizar outro tipo de análise e alterar as propriedades dos materiais introduzidas inicialmente, o que permite testar e analisar com outra sensibilidade os resultados finais. Uma outra vantagem é a simulação e modelação de barreiras de proteção, fornecendo informações sobre a energia cinética e localização do impacto sobre uma barreira, facilitando a determinação da capacidade, tamanho e localização dos obstáculos.

Na introdução de dados referentes às barreiras de proteção é necessário perceber algumas características fundamentais, como por exemplo: i) Barreiras perfeitamente elásticas: coeficiente de restituição=1; ii) Barreiras perfeitamente não elásticas: coeficiente de restituição=0; iii) Personalizadas: coeficiente de restituição compreendido entre 0 e 1.

O programa permite a definição de recetores de dados que facilitem o acompanhamento do comportamento dos blocos rochosos ao longo da sua trajetória. Não existe qualquer tipo de restrição quanto ao número de recetores de dados a serem utilizados, uma vez que estes não influenciam o movimento dos blocos e não apresentam qualquer tipo de propriedades. Este programa também disponibiliza uma função de filtragem que permite a visualização da informação estatística obtida, bem como gráficos de distribuição das trajetórias selecionadas.

---

### ***3. CASO DE ESTUDO: INVESTIGAÇÕES GEOTÉCNICAS E GEOMECÂNICAS DA ESCARPA DE S. CRISTÓVÃO (CINFÃES)***

---

(Página propositadamente em branco)

### 3.1. Descrição da área de S. Cristóvão de Nogueira

A cidade de Cinfães situa-se no norte de Portugal, mais concretamente na sub-região do Tâmega, pertencente ao distrito de Viseu. Segundo Pereira & Cunha (2010), o nome desta cidade pode ter como origem o termo latino *Cynfane* (Figura 37A) .

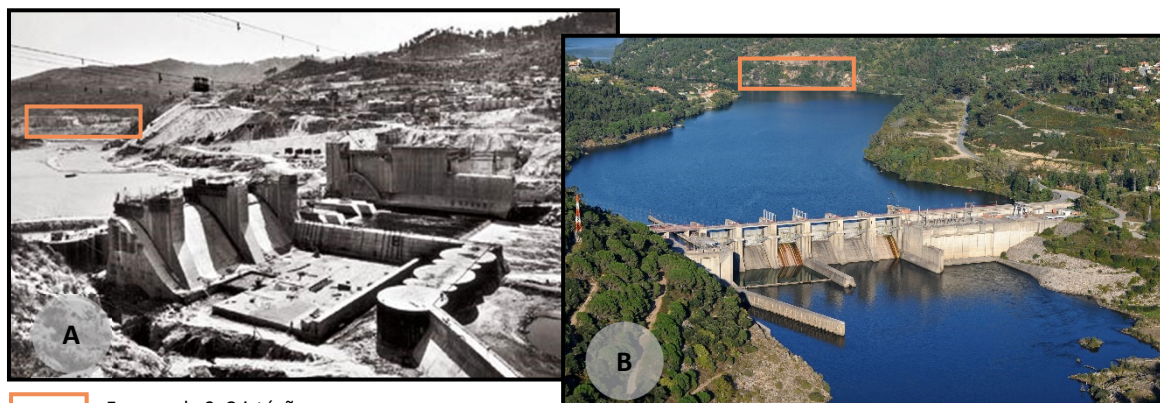
Em termos de curiosidade, Cinfães acolheu figuras importantes para a história nacional como rei D. Afonso Henriques, o médico Egas Moniz e o explorador militar A. Serpa Pinto.

Relativamente a monumentos, numa freguesia de Cinfães, S. Cristóvão de Nogueira, existe uma igreja construída na Baixa Idade Média (1000 - 1453) e que pertence à Rota do Românico (Figura 37B).



**Figura 37** - A) Cidade de Cinfães e o Rio Douro; B) Igreja de S. Cristóvão de Nogueira (A - <http://picssr.com/photos/spimenta/>; B - <http://cultura.culturamix.com/>).

Outro facto, para aproveitar o Rio Douro para a produção de energia elétrica, em 1965, a EDP, iniciou a construção da barragem do Carrapatelo, inaugurando-a em 1972. Esta faz fronteira entre o distrito do Porto e Viseu, mais concretamente, nos concelhos de Marco de Canaveses e Cinfães, respetivamente. Na Figura 38A é possível visualizar a construção da barragem e na Figura 38B após a sua conclusão.



**Figura 38** - A) Estaleiro da Barragem do Carrapatelo; B) Barragem do Carrapatelo e Cinfães (A - <http://www.ordemengenheiros.pt/pt/centro-de-informacao/>; B - <http://electricideas.wordpress.com/>).



Ao longo deste capítulo serão apresentados, de forma sintética, o enquadramento geográfico, geológico, geomorfológico e hidroclimatológico, que em certa parte afetam a estabilidade da escarpa rochosa de S. Cristóvão (Cinfães).

### 3.2. Enquadramento regional: geográfico, geológico e geomorfológico

#### 3.2.1. Enquadramento geográfico

A escarpa de S. Cristóvão localiza-se no distrito de Viseu, concelho de Cinfães e freguesia de S. Cristóvão de Nogueira (Figura 39). O concelho de Cinfães é composto por 14 freguesias, tendo uma superfície de 239,3 km<sup>2</sup>. O município é limitado a Norte por Marco de Canaveses e Baião, a Nordeste por Resende, a Sul por Castro Daire e Arouca e a Oeste por Castelo de Paiva. A freguesia em estudo apresenta uma área de 18,2 km<sup>2</sup> e uma população de 1 930 habitantes (INE, 2011), traduzindo-se por uma densidade populacional baixa (*ca.* 106 hab/km<sup>2</sup>).

Em termos de altitude, a área em estudo caracteriza-se pela existência de um grande contraste, pois varia entre os 170 m no lugar de Vila Nova e os 50 m na base da escarpa de S. Cristóvão junto à margem do Rio Douro.

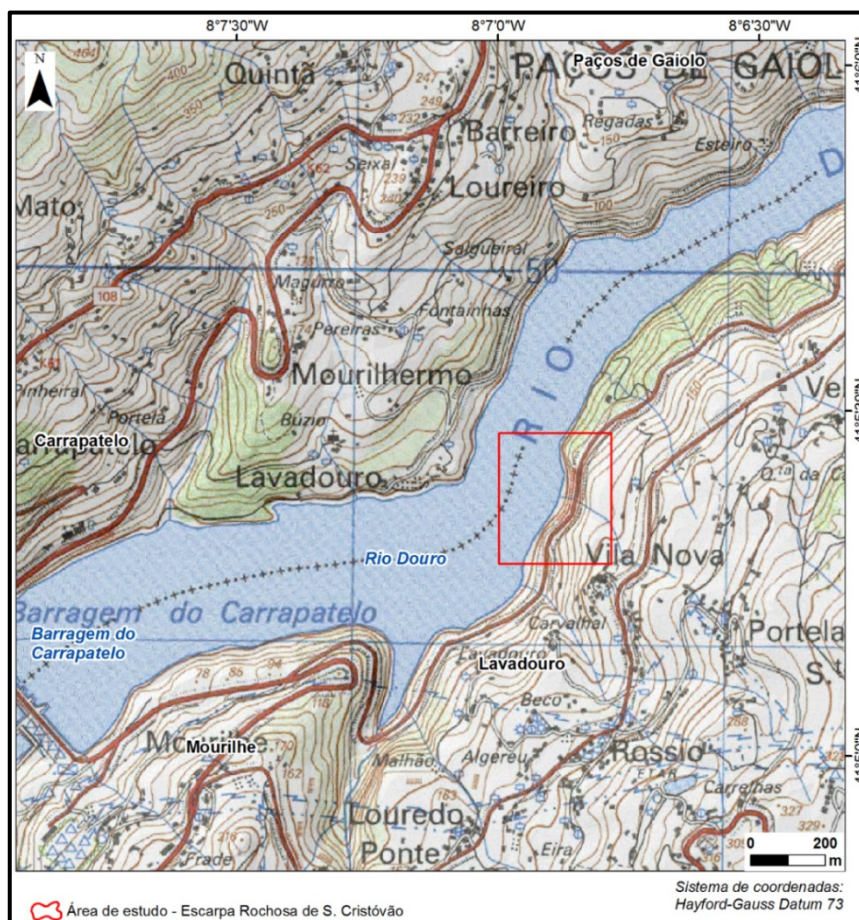


Figura 39 - Localização geográfica da escarpa rochosa de S. Cristóvão (Cinfães).

---

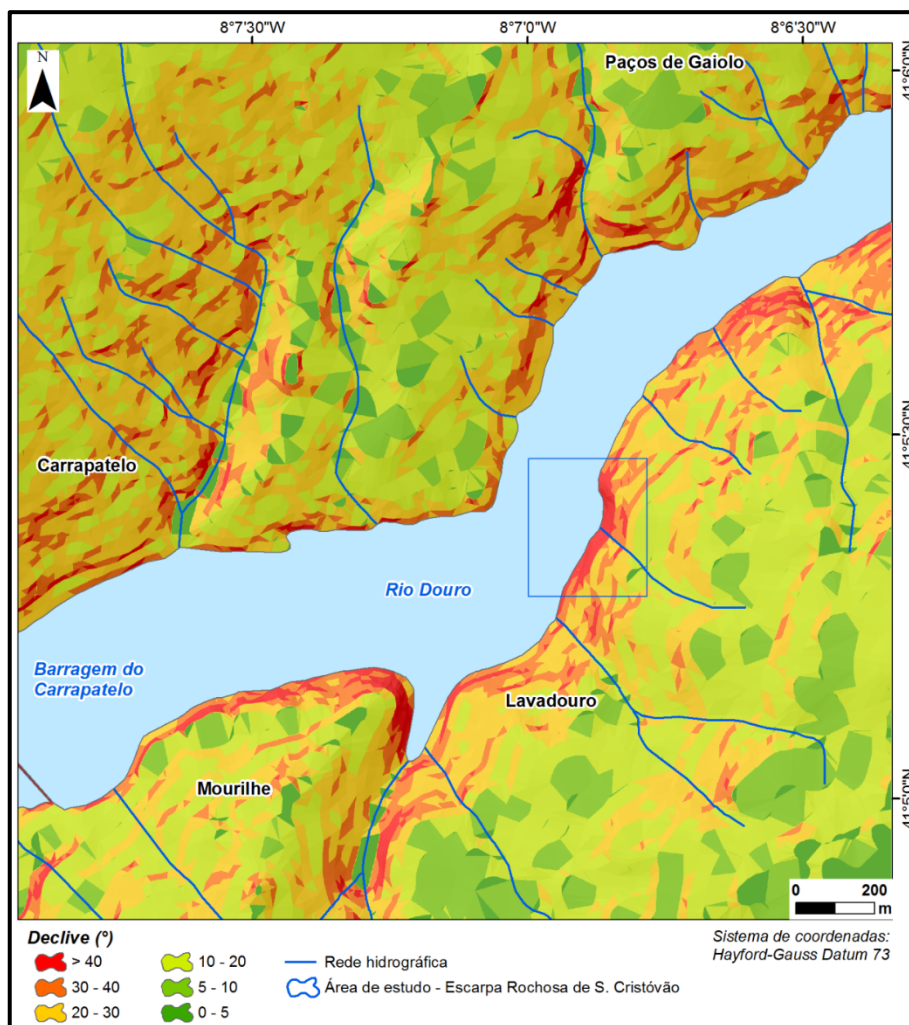
Na Figura 40 é possível visualizar vários aspetos da escarpa de S. Cristóvão, nomeadamente: a vista geral da área em estudo, com a vegetação de elevado porte na zona superior da escarpa e a rocha nua na parte inferior até à estrada municipal afetada pela queda dos blocos rochosos, a evidência da queda de blocos, as condições de elevada instabilidade, os declives acentuados e a quantidade de água presente em certas zonas da escarpa.



**Figura 40** - Aspetos gerais da escarpa rochosa de S. Cristóvão.

No que concerne aos declives da área em estudo, pode-se observar na Figura 41 que predominam os declives acentuados, superiores a 30°, ao longo do vale do Douro, onde se enquadra a área de estudo. Localmente, na escarpa de S. Cristóvão observam-se valores de declive superiores pontuais, podendo superar os 60°. Para esta situação contribuem o encaixe do Rio Douro, juntamente, com a antiga exploração de agregados para a construção da barragem, a qual deixou a escarpa exposta.





**Figura 41** – Mapa de declives da escarpa rochosa de S. Cristóvão (Cinfães).

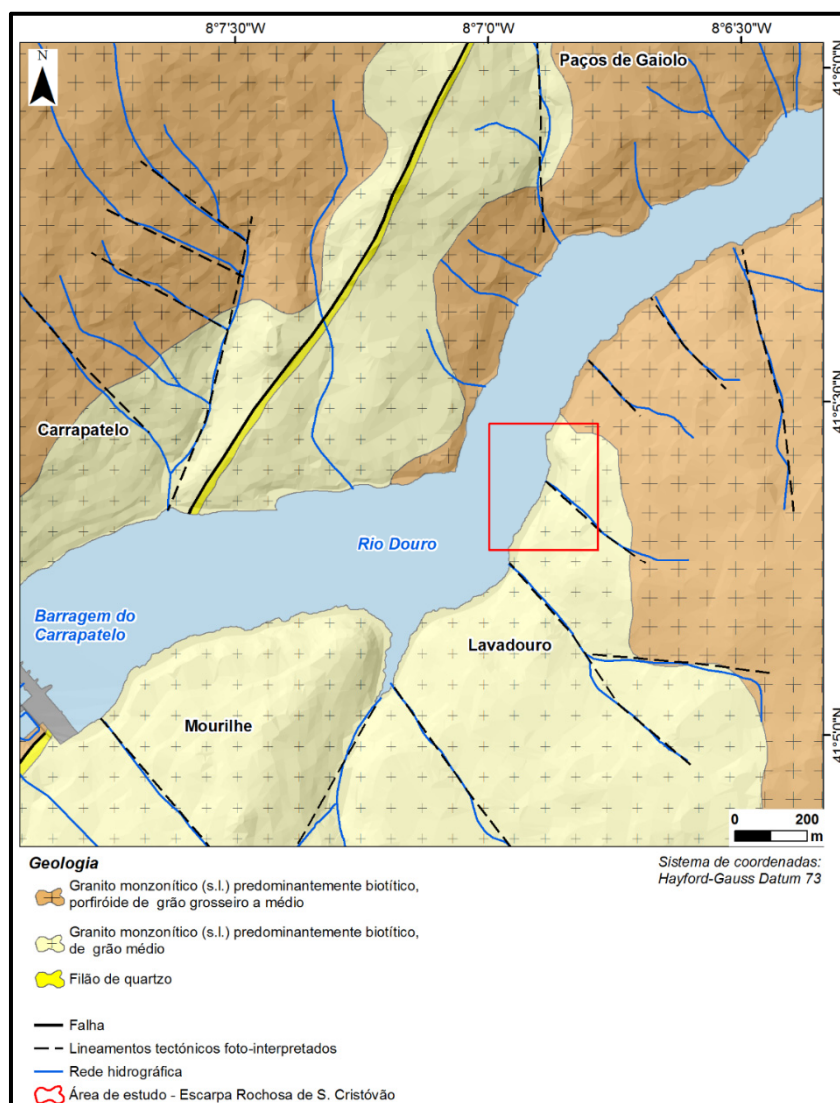
### 3.2.2. Enquadramento geológico

A área de S. Cristóvão enquadra-se numa grande faixa de granitóides Variscos, com orientação geral NW – SE, que se estendem desde o Alto Minho até às Beiras (e.g., Ferreira et al., 1987; Pereira et al., 1989; Oliveira et al., 1992). Do ponto de vista geotectónico a região insere-se na Zona Centro – Ibérica (ZCI) do Maciço Ibérico (Ferreira et al., 1987; Ribeiro et al., 2007).

Em quase toda a área de estudo existem este tipo de rochas, com a exceção de um filão de quartzo que a atravessa na direção NE – SW, das quais se fará uma breve descrição (pormenores em Teixeira et al., 1968; Teixeira, 1973; Pereira et al., 1989). Assim, a mancha de rocha que aflora na escarpa de S. Cristóvão é um granito porfiróide de grão grosseiro ou grosseiro a médio, predominantemente biotítico. Corresponde a um monzogranito muito rico em feldspato potássico, porfiróide, essencialmente biotítico contendo raros encraves microgranulares. Como referido anteriormente, esta unidade geológica é interrompida por um filão de quartzo, que se caracteriza por ter horizontes de alteração em geral muito espessos, que podem atingir por vezes 10 a 20 m, sendo constituídos

por materiais arenosos e argilosos resultantes, respetivamente, pela meteorização mecânica, por desagregação do quartzo e alteração meteórica, por desagregação dos feldspatos.

Na área de S. Cristóvão aflora um granito semelhante, mas que se distingue pelo facto de ser não porfiróide e de grão médio (Figura 42 e 43). Nesta área mais inclinada do vale do Douro, as formações superficiais resultantes da alteração do granito são menos representativas.



**Figura 42** – Enquadramento geológico da escarpa rochosa de S. Cristóvão (Cinfães) (adaptado e revisto de Teixeira et al., 1968).

O contexto geológico – estrutural da região em estudo é denominado por uma rede de estruturas em grande (falhas regionais e fraturação associada) que sugerem controlar as formas de relevo. O sistema de fraturação que ocorre segundo as direções NNE – SSW e NE – SW é bastante representativo nesta área, sendo, nas direções mais próximas a NNE – SSW, paralelo à mega-estrutura regional “falha Verin-Régua-Penacova” e nas direções mais aproximadas de NE – SW

paralelo à “falha do Tâmega”, esta última bem representada entre Amarante e Entre-os-Rios (Cabral & Ribeiro, 1988; Pereira et al., 1993). Estas estruturas condicionam a instalação de alguns dos troços do Rio Douro e alguns cursos de água de menor dimensão.

Um outro sistema idêntico ao interior, de direção aproximada NW – SE, direção que se aparenta à da mega-estrutura regional Vigo-Régua (Ferreira et al., 1987). Este sistema de estruturas condiciona alguns dos troços dos pequenos afluentes principais do Douro desta área. A sua interseção com o sistema NNE – SSW a NE – SW resulta num traçado da rede hidrográfica pautado por mudanças bruscas de direção, por vezes em ângulos aproximadamente retos.

Como foi referido anteriormente, o aproveitamento da rede de falhas (e fraturas associadas) para instalação dos cursos de água não é tão evidente no sistema, mas é discreto com orientação aproximada NNE – SSW. Os lineamentos com direção aproximada E – W apresentam, em geral, pouca continuidade, e uma importância relativamente baixa na definição das formas de relevo e instalação da rede hidrográfica.



**Figura 43** - Aspectos de campo das formações geológicas aflorantes na área de S. Cristóvão: A) falha subvertical; B) alteração do granito; C) bloco rochoso destacado do maciço; D) pormenor do granito de grão médio.

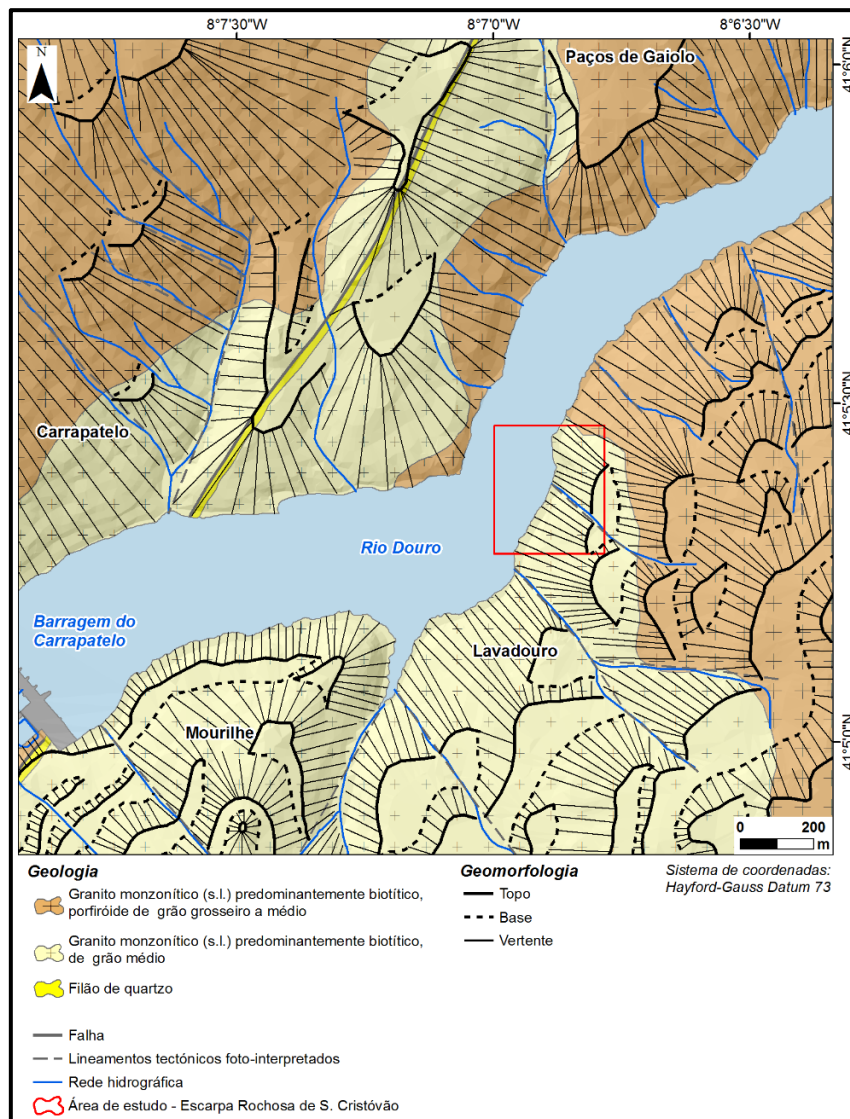


---

### **3.2.3. Enquadramento geomorfológico**

A morfologia da área de S. Cristóvão é dominada pela geometria dos lineamentos tectónicos que serão os principais responsáveis pelo arranjo regional do relevo nesta área. Destaca-se um conjunto de estruturas geológicas com direções NE-SW e NW-SE, que parecem controlar a instalação e incisão dos tributários do Douro nesta área, que apresentam vales bastante profundos. Esta disposição evidencia um entalhe quase exclusivo pela rede hidrográfica secundária, a qual corresponde nalguns casos a vales de fratura alinhados, típicos do modelado granítico (O. Ribeiro et al., 1987a). Tal como noutras regiões graníticas do Norte de Portugal a morfologia da área envolvente apresentada é marcada pela conservação de superfícies de aplanamento, separadas por vertentes abruptas, quer se trate de flancos das elevações quer das vertentes dos vales. Por isso, os cursos de água apresentam um traçado geométrico que resulta da sua adaptação a corredores de esmagamento materializados por falhas geológicas regionais (Brum Ferreira, 1978, 1979).

Na área de S. Cristóvão (Figura 44) merecem ainda destaque, em termos morfológicos, a continuidade das vertentes, bem como o seu declive. Na área verifica-se a existência de vertentes com declives elevados, por vezes superiores 30°, que ligam superfícies ligeiramente aplanadas ao vale do Douro, com diferenças de cota superiores a 250 m entre si, e que se desenvolvem ao longo 500 a 1000 m de extensão.



**Figura 44** – Enquadramento geomorfológico da escarpa rochosa de S. Cristóvão (Cinfães).

### 3.3. Hidroclimatologia

Portugal Continental apresenta características climáticas próprias, distinguindo-se claramente das restantes regiões europeias. A peculiaridade do seu clima prende-se, basicamente, com a posição marginal do continente português relativamente ao Oceano Atlântico, numa latitude subtropical (Ribeiro et al., 1987, 1988). A precipitação, no Norte de Portugal, começa por aumentar do litoral para o interior, devido à existência de barreiras orográficas, diminuindo, por sua vez, à medida que se penetra na periferia da região central da Península Ibérica. Ribeiro et al. (1987, 1988) dividem Portugal Continental em províncias climáticas, enquadrando a região de Cinfaes na Província Montanhosa do Norte de Portugal. Esta província caracteriza-se por um Verão quente e um Inverno frio e nevoso. As precipitações são elevadas, sobretudo nos topos das montanhas, e os nevoeiros são frequentes, exceto no Verão.

---

O concelho de Cinfães apresenta um importante traço morfológico, relativo à variação altimétrica, que condiciona a temperatura e a precipitação. Este facto permite constatar fortes contrastes térmicos e pluviométricos, nomeadamente entre as áreas situadas no vale do Douro (limite N) e o seu relevo mais elevado, a Serra de Montemuro (limite SE).

A área em estudo, situada no vale do Rio Douro, caracteriza-se por Verões mais quentes, ainda que sujeita a nevoeiros persistentes, em contraste com a Serra de Montemuro onde os Verões são mais frescos e os Invernos mais rigorosos, geralmente com temperaturas negativas.

Relativamente à temperatura média anual, esta apresenta valores na ordem dos 14,0°C. A precipitação apresenta valores médios anuais a variar entre 1200 mm, nos vales do Rio Paiva e Douro (onde se localiza a área em estudo) e os 2500 mm na Serra de Montemuro (Vasconcelos et al., 2000).

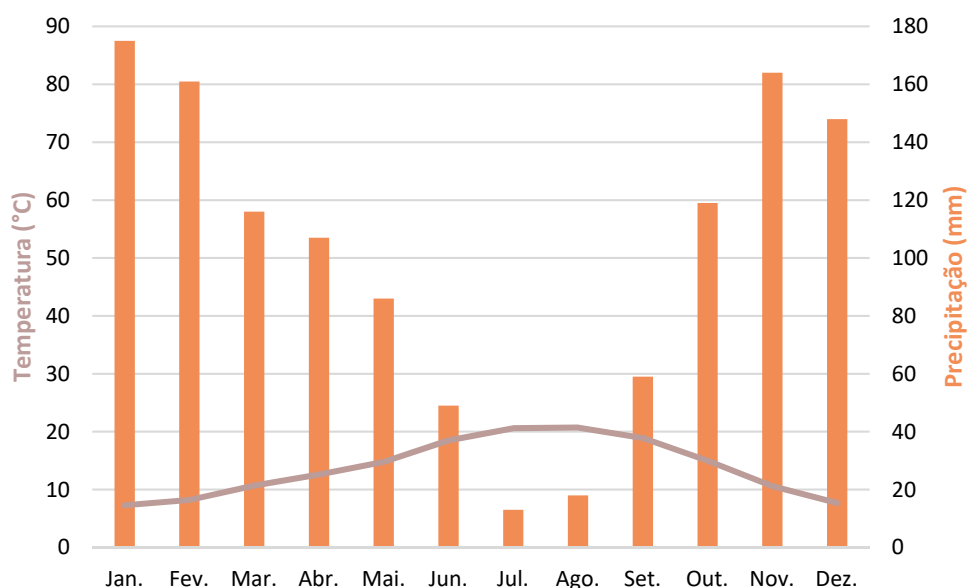
Segundo a classificação de Köppen, a área de estudo apresenta um clima de tipo Csb (Peel et al., 2007), ou seja:

- Clima mesotérmico (temperado) húmido, em que a temperatura do mês mais frio é inferior a 18°C, mas superior a - 3°C, enquanto o mês mais quente apresenta valores superiores a 10°C;
- Estação seca no Verão, em que a quantidade de precipitação do mês mais seco do semestre quente é inferior a 1/3 da do mês mais chuvoso do semestre frio e inferior a 40 mm;
- Verão pouco quente, mas extenso, em que a temperatura média do ar no mês mais quente do ano é inferior a 22°C, havendo mais de quatro meses cuja temperatura média é superior a 10°C.

Para a caracterização climática local, uma vez que os registos locais são escassos, recorreu-se a dados obtidos por modelos matemáticos<sup>4</sup>. Assim, esta estação apresenta os seguintes valores: a temperatura média anual do ar é de 14°C, com um valor mínimo no mês de janeiro (7,5°C) e um valor máximo nos meses de julho e agosto (20,8°C); a precipitação total anual corresponde a 1198 mm, com o valor máximo a registar-se em janeiro (171 mm) e o valor mínimo em julho (13 mm). Constata-se, através do diagrama termo-pluviométrico (Figura 45), que o período seco na região corresponde aos meses de julho e agosto.

---

<sup>4</sup> Dados obtidos em “climate data for cities worldwide” [<http://en.climate-data.org/>]. Estes dados são obtidos através de modelos matemáticos, tendo por base centenas de estações em todo o mundo. Verificou-se que, no caso em apreço, os valores eram semelhantes aos referidos na bibliografia, nomeadamente aos valores médios anuais.



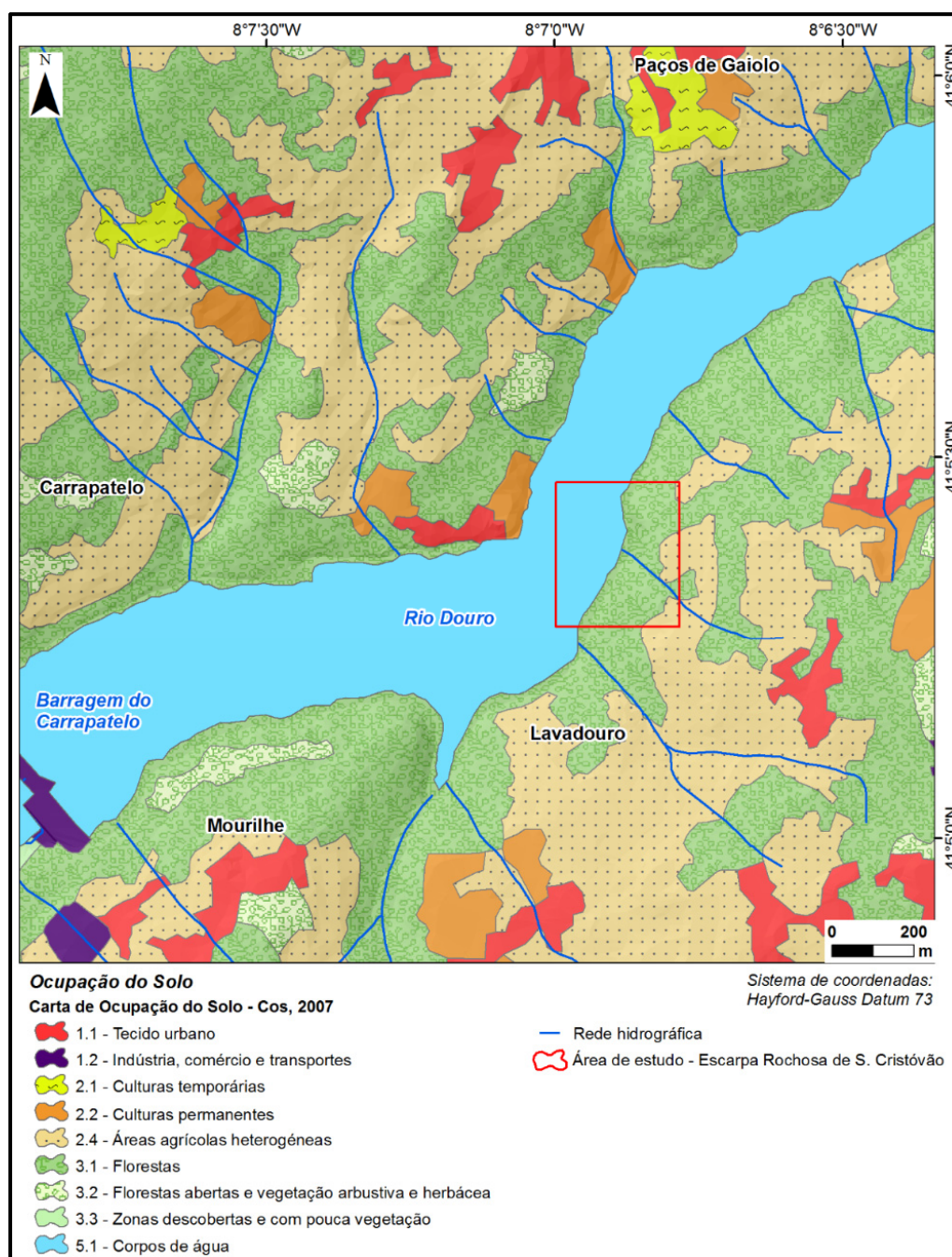
**Figura 45** - Diagrama termo – pluviométrico de S. Cristóvão de Nogueira (<http://www.climate-data.org>).

### 3.4. Ocupação do solo e breves condicionantes de ordenamento

De acordo com a carta de uso e ocupação do solo de Portugal Continental para 2007, COS2007 (IGP, 2010) verifica-se a existência de uma heterogeneidade de usos na área em estudo e na sua envolvente (Quadro 16 e Figura 46).

**Quadro 16** – Classes De ocupação do solo na área envolvente à escarpa rochosa de S. Cristóvão (Cinfães) (cf. figura 45).

| Uso do solo<br>COS (2007)                          | Área total         |            | Escarpa rochosa de S.<br>Cristóvão |            |
|--|--------------------|------------|------------------------------------|------------|
|  | (km <sup>2</sup> ) | %          | (km <sup>2</sup> )                 | %          |
| Tecido urbano                                      | 0,31               | 6,0        | -                                  | -          |
| Indústria, comércio e transportes                  | 0,03               | 0,6        | -                                  | -          |
| Culturas permanentes                               | 0,17               | 3,3        | -                                  | -          |
| Culturas temporárias                               | 0,06               | 1,2        | -                                  | -          |
| Áreas agrícolas heterogêneas                       | 1,68               | 32,7       | 0,01                               | 9,1        |
| Florestas  | 1,95               | 37,9       | 0,05                               | 45,5       |
| Florestas abertas e vegetação arbustiva e herbácea | 0,13               | 2,5        | -                                  | -          |
| Zonas descobertas e com pouca vegetação            | 0,002              | 0,0        | -                                  | -          |
| Corpos de água                                     | 0,81               | 15,8       | 0,05                               | 45,5       |
| <b>TOTAL</b>                                       | <b>5,14</b>        | <b>100</b> | <b>0,11</b>                        | <b>100</b> |



**Figura 46** – Carta de ocupação do solo na área envolvente à escarpa rochosa de S. Cristóvão (Cinfães).

Relativamente à área envolvente à escarpa rochosa de S. Cristóvão, representada na Figura 45 e totalizando uma área de 5,14 km<sup>2</sup>, verifica-se que a classe com maior representatividade (segundo a COS2007 – nível 2) é a classe das Florestas (37,9%). Seguem-se as áreas agrícolas heterogêneas (32,7%), os corpos de água (15,8%) e o tecido urbano (6,0%). Estas classes representam 92,4% da área total, os restantes 7,6% correspondem às classes com menor representatividade, nomeadamente as culturas permanentes (3,3%), florestas abertas e vegetação arbustiva e herbácea (2,5%), as culturas temporárias (1,2%) e a indústria comércio e transportes (0,6%).

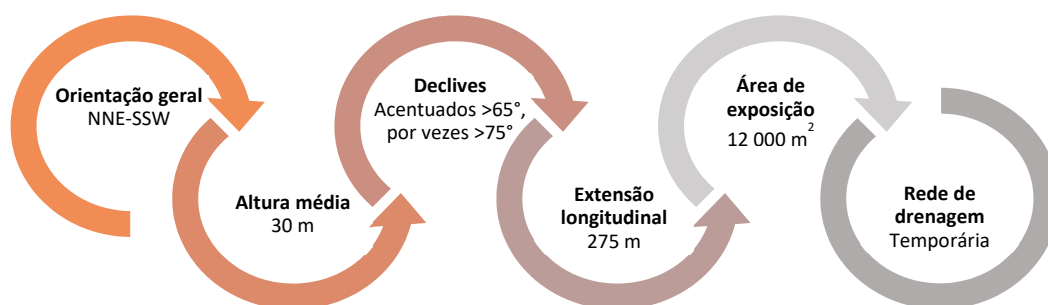


A área em estudo (escarpa rochosa de S. Cristóvão) corresponde a 2,1% da área total representada. No que concerne aos usos do solo com maior representatividade, estas correspondem a florestas (45,5%), seguidas das áreas agrícolas heterógenas (9,1%). Os restantes 45,5% da área são ocupados pela classe dos corpos de água, que correspondem a parte do espelho de água da Barragem do Carrapatelo (Rio Douro). O trabalho de inspeção efetuado na área em estudo permitiu validar os dados agora apresentados.

### 3.5. Caracterização do talude e condições geológicas e geotécnicas

#### 3.5.1. Generalidades

A avaliação de campo do talude de S. Cristóvão permitiu caracterizá-lo em termos globais, como se pode visualizar na Figura 47.



**Figura 47** - Caracterização geral da escarpa rochosa de S. Cristóvão (Cinfães).

Os estudos geológicos de campo levados a cabo permitiram o reconhecimento geomorfológico, geoestrutural e geológico do local. O reconhecimento permitiu ainda definir a unidade geológica dominante e o zonamento geotécnico principal, os quais foram caracterizados em termos geomecânicos com base em ensaios esclerométricos sistemáticos no maciço rochoso (descontinuidades e rocha intacta). Neste tópico apresenta-se uma síntese dos resultados obtidos para o talude rochoso em estudo e, com estes, as conversões necessárias, adotando os critérios e fatores de segurança específicos, para determinar os parâmetros a introduzir nos programas geotécnicos de cálculo numérico.

---

### 3.5.2. Estudos geológico-geotécnicos

No talude estudado reconheceu-se como unidade litológica o granito monzonítico, predominantemente biotítico, de grão médio (detalhes em Teixeira et al., 1968). Em regra, esta rocha encontra-se pouco a moderadamente alterada ( $W_{1-2}$  a  $W_3$ ), de cor acinzentada, por vezes com tonalidades amareladas.

De uma maneira geral, o maciço desta escarpa apresenta um elevado grau de descontinuidades. Destacam-se as estruturas, nomeadamente, diaclases e falhas, geradas em regime frágil a dúctil-frágil, mais superficiais e associadas ao alívio de tensões do maciço. O conjunto litológico encontra-se muito tectonizado, o que é evidenciado principalmente por uma série de falhas, por vezes com caixas de falha argilosas (“fault gouge”), com uma extensão apreciável, superiores a 50 m. Observou-se, ainda, fraturação a materializar descontinuidades caracterizadas por faixas sub-horizontais ( $< 45^\circ$ ) de intensa deformação cisalhante (interpretadas como milonitos) e, por vezes, sub-verticais ( $> 80^\circ$ ) constituindo compartimentos tectónicos.

### 3.5.3. Zonamento geotécnico

Com o resultado do cruzamento e da síntese de toda a informação geológica, geotécnica e geomecânica recolhida, foi possível elaborar um esboço da qualidade geotécnica do talude de S. Cristóvão. Deste estudo, obtiveram-se os resultados seguidamente descritos.

No Quadro 17 apresenta-se uma síntese global para todo o talude dos parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos<sup>5</sup> resultantes do levantamento de campo recorrendo à técnica de amostragem linear (e.g., Priest, 1993; Lamas, 1993; Dinis da Gama, 1995; Chaminé et al., 2015; Watkins et al., 2015). Para o efeito seguiu-se, ainda, as recomendações geotécnicas da ISRM (1978, 1981) e da CFCFF (1996), bem como os aspetos de geotecnia de taludes e da geomecânica de maciços rochosos (e.g., Hoek & Bray, 1981; Wyllie & Mah, 2004; Alejano et al., 2012; Wyllie, 2014; Aydin, 2015).

O maciço rochoso apresenta-se, globalmente, ligeiramente alterado ( $W_{1-2}$ ) a moderadamente alterado ( $W_3$ ). Foram registados 138 planos de descontinuidades, a maioria dos quais diaclases, que permitiram definir três famílias principais: uma dominante  $N110^\circ-140^\circ E; 75^\circ-90^\circ NE$  e as restantes  $N65^\circ-100^\circ E; 75^\circ-85^\circ SE/NE$  e  $N10^\circ-30^\circ E; 65^\circ-85^\circ NW$ . Na generalidade, em termos de espaçamento (*fracture intercept*), as descontinuidades apresentam-se afastadas ( $F_{1-2}$ ), com uma mediana global de 140 cm. Relativamente à abertura e ao preenchimento, estas variam de abertas a muito abertas

---

<sup>5</sup> No anexo I encontra-se um excerto da ficha de inspeção geral da escarpa de S. Cristóvão.

---

e, em geral, não preenchidas, apesar de 30% das descontinuidades se encontrarem preenchidas por argila, na maioria dos casos mole. As descontinuidades apresentam-se algo rugosas ( $R_3$ ) e onduladas, medianamente contínuas, planas a pouco curvas ( $C_{1-2}$ ) e com terminações maioritariamente obscuras, ou seja, muito penetrativas. Salienta-se, no entanto, que cerca de 4% das descontinuidades se apresentam contínuas a muito contínuas, com continuidades superiores a 15 m, correspondendo a falhas sub-paralelas à face do talude. Relativamente à presença de água, o maciço encontra-se húmido ( $< 0,01$  L/s).

Neste talude foram realizadas 45 estações geomecânicas (ensaio esclerométrico), as quais conduziram a uma resistência à compressão uniaxial [UCS] elevada ( $S_{1-2}$ ), com a mediana a rondar os 73 MPa.

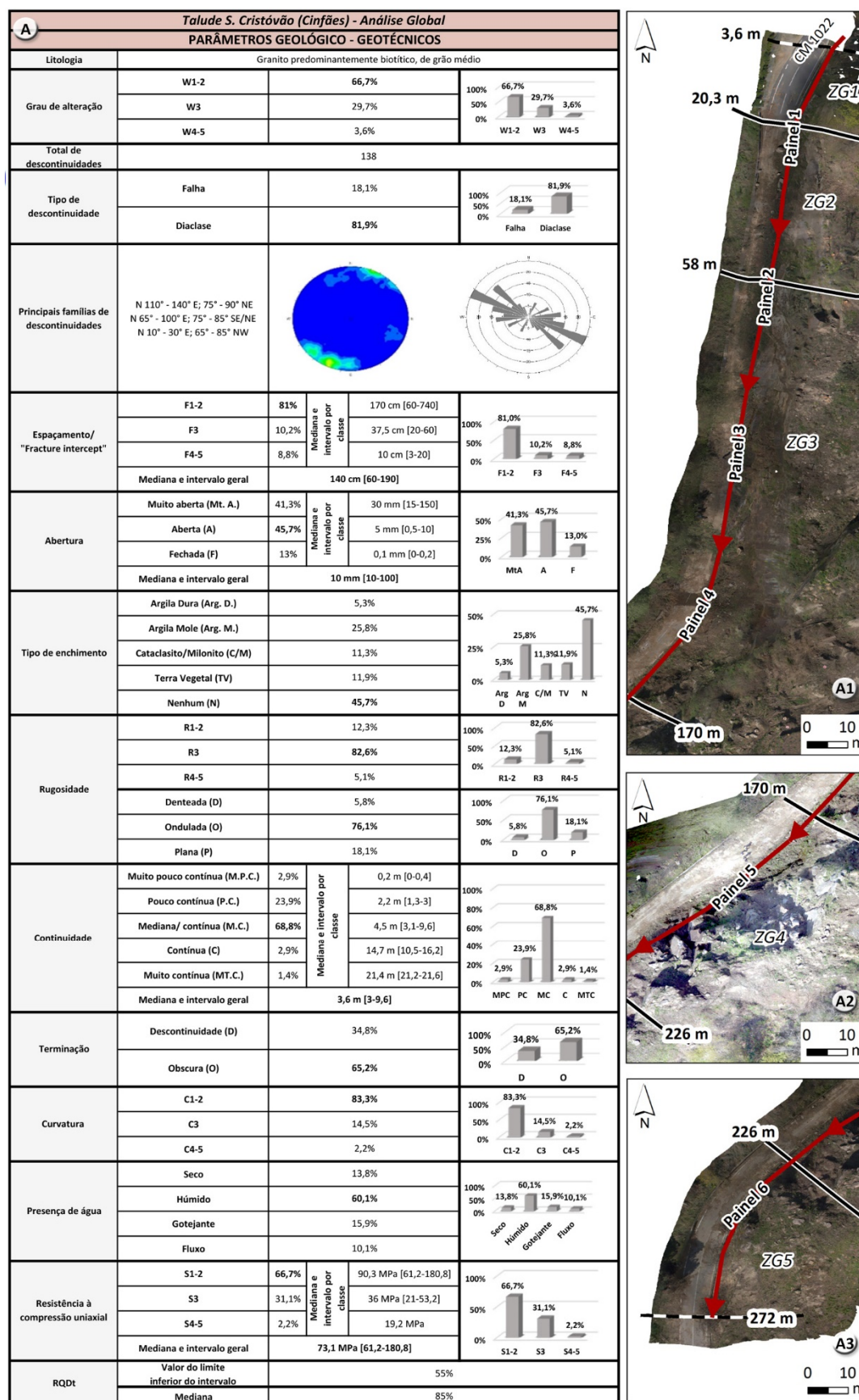
É de salientar que as descontinuidades sub-paralelas à face do talude foram consideradas para o estudo da análise de estabilidade, mas não foram contabilizadas na análise estatística.

Foram definidas cinco zonas geotécnicas, as quais se descrevem nos tópicos seguintes. As coordenadas geográficas da linha de amostragem são e esta contempla um total de 272 m de extensão:

→ **Início:** 41° 05' 28,676" N; 08° 06' 46,910" W;

→ **Fim:** 41° 05' 20,767" N; 08° 06' 51,000" W.

**Quadro 17 – A)** Quadro síntese de todos os parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos cartografados ao longo da “scanline” (segundo a ISRM, 1978, 1981) do maciço do talude de S. Cristóvão (Cinfães); A1) Zonas geotécnicas 1, 2 e 3; A2) Zona geotécnica 4; A3) Zona geotécnica 5.

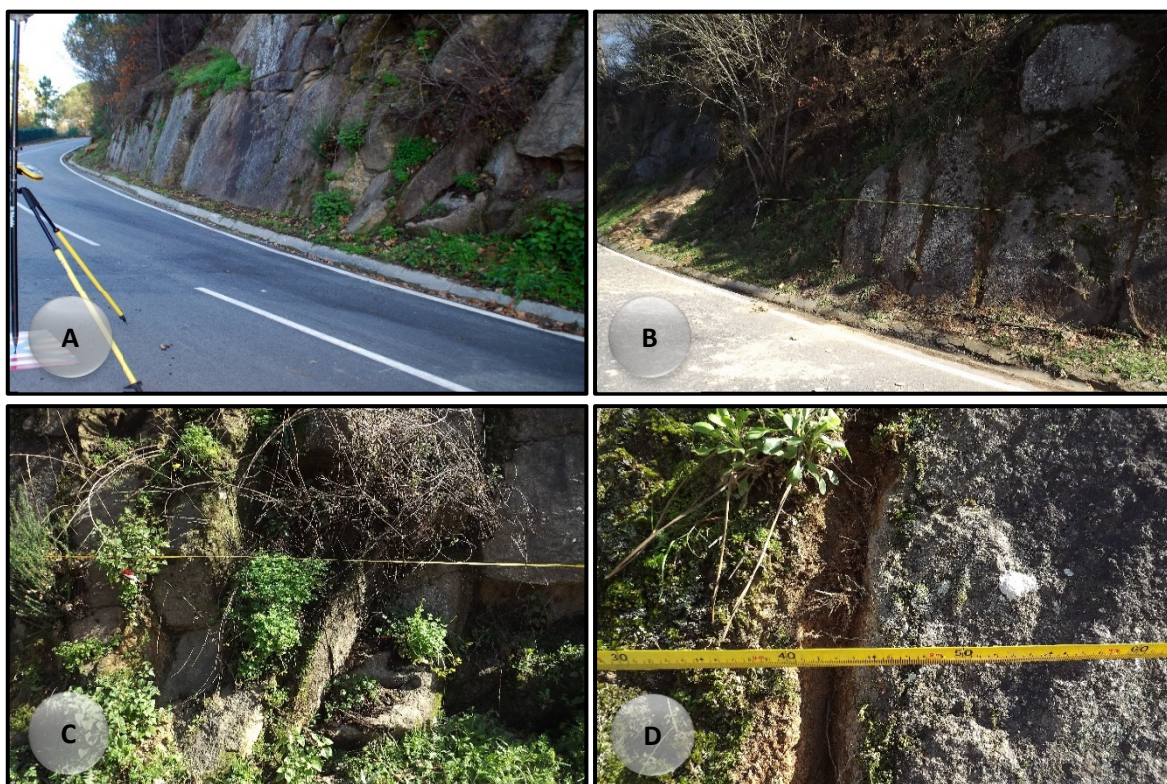




→ **Zona geotécnica 1 (ZG1)**

Esta zona tem uma extensão de 16,7 m, sendo a sua orientação média de N24°E;74°NW (Figura 48). No Quadro 18 apresenta-se uma síntese dos parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos resultantes do levantamento de campo.

O maciço apresenta-se nesta zona moderadamente a ligeiramente alterado ( $W_3$  a  $W_{1-2}$ ). Foram registados 19 planos de descontinuidades, correspondendo 68% destas a falhas. Foi possível identificar duas famílias principais, uma dominante N110°-140°E;75°-90°NE e outra N20°-70°E;65°-85°NW. As descontinuidades apresentam-se maioritariamente afastadas ( $F_{1-2}$ ), com uma mediana global de 70 cm, muito abertas e, em termos de enchimento cerca de 46% são preenchidas por argila, maioritariamente dura. No geral, as descontinuidades apresentam-se pouco rugosas ( $R_{1-2}$ ) e são, na sua totalidade, onduladas. Em termos de continuidade, são medianamente contínuas, planas a pouco curvas ( $C_{1-2}$ ) e as suas terminações são obscuras. Relativamente à presença de água, esta zona apresenta-se, na maior parte da sua extensão, húmida. Aqui foram realizadas 5 estações geomecânicas, as quais conduziram a uma resistência à compressão uniaxial média ( $S_3$ ), com uma mediana estimada em 47 MPa.



**Figura 48** - Aspetos gerais da Zona Geotécnica 1: A), B) vista do maciço rochoso cartografado; C) família principal de descontinuidades (NW-SE); D) pormenor da abertura e preenchimento argiloso das descontinuidades.

**Quadro 18** - Quadro-síntese de todos os parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos (segundo a ISRM, 1978, 1981) do maciço da Zona Geotécnica 1 (ZG1).

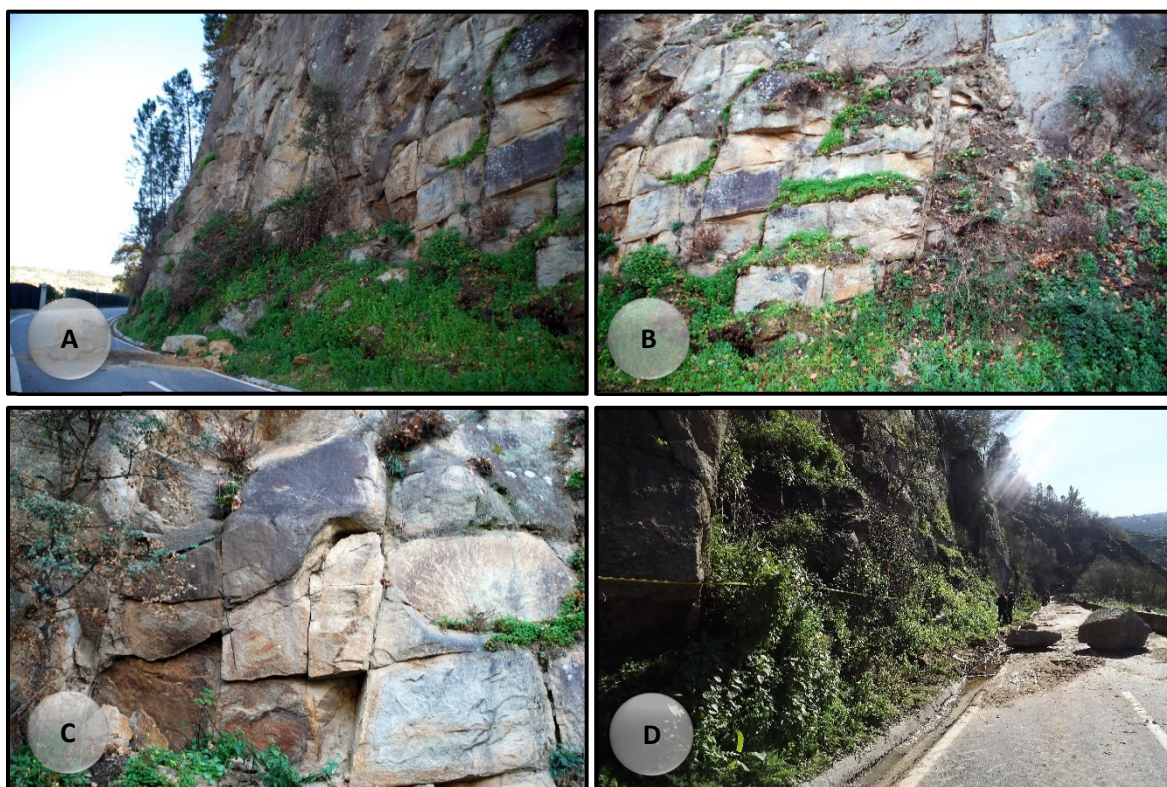
| Talude S. Cristóvão (Cinfães) - Zona Geotécnica 1 (ZG1) |  |       |                                |  |   |  |
|---|--|-------|--------------------------------|--|---|--|
| PARÂMETROS GEOLÓGICO - GEOTÉCNICOS                      |  |       |                                |  |   |  |
| Litologia   | Granito predominantemente biotítico, de grão médio           |       |                                |  |   |  |
| Grau de alteração                                       | W1-2   | 42,1% |                                | 100%<br>50%<br>0%<br><br>W1-2    W3                      |   |  |
|   | W3   | 57,9% |                                |  |   |  |
| Total de descontinuidades                               | 19   |       |                                |  |   |  |
| Tipo de descontinuidade                                 | Falha  | 68,4% |                                | 100%<br>50%<br>0%<br><br>Falha    Diaclase               |   |  |
|   | Diaclase   | 31,6% |                                |  |   |  |
| Principais famílias de descontinuidades                 | N 110° - 140° E; 75° - 90° NE<br>N 20° - 70° E; 65° - 85° NW |       |                                |  |   |  |
| Espaçamento/ "Fracture intercept"                       | F1-2   | 66,7% | Mediana e intervalo por classe | 101 cm [67-170]  | 100%<br>50%<br>0%<br><br>F1-2    F3    F4-5 |  |
|   | F3   | 16,7% |                                | 45 cm [35-60]  |   |  |
|   | F4-5   | 16,7% |                                | 10 cm [5-18]   |   |  |
|   | Mediana e intervalo geral                                    |       | 70 cm [60-170]                 |  |   |  |
| Abertura  | Muito aberta (MtA)   | 68,4% | Mediana e intervalo por classe | 30 mm [15-60]  | 100%<br>50%<br>0%<br><br>MtA    A    F      |  |
|   | Aberta (A)   | 26,3% |                                | 10 mm  |   |  |
|   | Fechada (F)  | 5,3   |                                | 0,1 mm   |   |  |
|   | Mediana e intervalo geral                                    |       | 20 mm [10-20]                  |  |   |  |
| Tipo de enchimento                                      | Argila Dura (Arg D)  | 35,7% |                                | 50%<br>25%<br>0%<br><br>Arg D    Arg M    C/M    TV    N |   |  |
|   | Argila Mole (Arg M)  | 10,7% |                                |  |   |  |
|   | Cataclasito/Milonito (C/M)                                   | 32,1% |                                |  |   |  |
|   | Terra Vegetal (TV)   | 10,7% |                                |  |   |  |
|   | Nenhum (N)   | 10,7% |                                |  |   |  |
| Rugosidade  | R1-2   | 57,9% |                                | 100%<br>50%<br>0%<br><br>R1-2    R3    R4-5              |   |  |
|   | R3   | 26,3% |                                |  |   |  |
|   | R4-5   | 15,8% |                                |  |   |  |
|   | Ondulada (O)   | 100%  |                                | 100%<br>50%<br>0%<br><br>O                               |   |  |
| Continuidade  | Pouco contínua (P.C.)  | 21,1% | Mediana e intervalo por classe | 2 m [1,8-2,4]  | 100%<br>50%<br>0%<br><br>PC    MC           |  |
|   | Mediana/ contínua (M.C.)                                     | 78,9% |                                | 4,1 m [3,6-9,6]  |   |  |
|   | Mediana e intervalo geral                                    |       | 3,25 m [3,1-9,6]               |  |   |  |
| Terminação  | Descontinuidade (D)  | 15,8% |                                | 100%<br>50%<br>0%<br><br>D    O                          |   |  |
|   | Obscura (O)  | 84,2% |                                |  |   |  |
| Curvatura   | C1-2   | 84,2% |                                | 100%<br>50%<br>0%<br><br>C1-2    C3    C4-5              |   |  |
|   | C3   | 10,5% |                                |  |   |  |
|   | C4-5   | 5,3%  |                                |  |   |  |
| Presença de água  | Seco   | 5,3%  |                                | 100%<br>50%<br>0%<br><br>Seco    Humido    Gotejante     |   |  |
|   | Húmido   | 89,5% |                                |  |   |  |
|   | Gotejante  | 5,3%  |                                |  |   |  |
| Resistência à compressão uniaxial                       | S1-2   | 40%   | Mediana e intervalo por classe | 89,1 MPa [80,3-98]                                       | 100%<br>50%<br>0%<br><br>S1-2    S3         |  |
|   | S3   | 60%   |                                | 42,4 MPa [21-46,9]                                       |   |  |
|   | Mediana e intervalo geral                                    |       | 46,9 MPa [21-50]               |  |   |  |
| RQDt  | Valor do limite inferior do intervalo                        | 55%   |                                |  |   |  |
|   | Mediana  | 60%   |                                |  |   |  |



→ **Zona geotécnica 2 (ZG2)**

Esta zona tem uma extensão de 37,7 m, apresentando uma orientação média de N17°E; 74°NW (Figura 49). No Quadro 19 apresenta-se uma síntese dos parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos resultantes do levantamento de campo.

O maciço apresenta-se nesta zona, fundamentalmente, moderadamente alterado ( $W_3$ ). Foram registados 27 planos de descontinuidades, correspondendo, na sua maioria, a diaclases. Foram identificadas duas famílias principais, uma dominante N130°- 155°E; 80°- 90°NE e outra N90°- 120°E; 75°- 90°NE. As descontinuidades apresentam-se, na sua maioria, afastadas, com uma mediana global de 113 cm. No que toca à abertura, variam desde fechadas a muito abertas, sendo o enchimento maioritariamente argila dura e mole. Em termos de rugosidade, estas apresentam-se algo rugosas ( $R_3$ ) e onduladas. Relativamente à continuidade, são medianamente contínuas, com terminações fundamentalmente noutras descontinuidades e apresentam-se planas a pouco curvas ( $C_{1-2}$ ). Em termos de presença de água, esta zona é fundamentalmente húmida. Foram realizadas 7 estações geomecânicas nesta zona, as quais conduziram a uma resistência à compressão uniaxial média ( $S_3$ ), com a mediana a rondar os 35 MPa.



**Figura 49** - Aspetos gerais da Zona Geotécnica 2: A), D) vista do maciço rochoso cartografado; B) família principal de descontinuidades (NW-SE) e compartimentação em grande do maciço com blocometria típica equidimensional a prismática na qual se evidencia as descontinuidades sub-horizontais; C) pormenor da foto reproduzida em B).

**Quadro 19** - Quadro-síntese de todos os parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos (segundo a ISRM, 1978, 1981) do maciço da Zona Geotécnica 2 (ZG2).

| Talude S. Cristóvão (Cinfães) - Zona Geotécnica 2 (ZG2) |   |        |                                |  |  |  |
|---|---|--------|--------------------------------|--|--|--|
| PARÂMETROS GEOLÓGICO - GEOTÉCNICOS                      |   |        |                                |  |  |  |
| Litologia   | Granito predominantemente biotítico, de grão médio            |        |                                |  |  |  |
| Grau de alteração                                       | W1-2  | 29,6%  |                                | 100%<br>50%<br>0%<br><br>W1-2 W3 W4-5                            |  |  |
|   | W3  | 63,0%  |                                |  |  |  |
|   | W4-5  | 7,4%   |                                |  |  |  |
| Total de descontinuidades                               | 27  |        |                                |  |  |  |
| Tipo de descontinuidade                                 | Falha   | 14,8%  |                                | 100%<br>50%<br>0%<br><br>Falha Diaclase                          |  |  |
|   | Diaclase  | 85,2%  |                                |  |  |  |
| Principais famílias de descontinuidades                 | N 130° - 155° E; 80° - 90° NE<br>N 90° - 120° E; 75° - 90° NE |        |                                |  |  |  |
| Espaçamento/ "Fracture intercept"                       | F1-2  | 81,5%  | Mediana e intervalo por classe | 120 cm [70-190]  | 100%<br>50%<br>0%<br><br>F1-2 F3 F4-5                  |  |
|   | F3  | 14,8%  |                                | 30 cm [25-35]  |  |  |
|   | F4-5  | 3,7%   |                                | 20 cm  |  |  |
|   | Mediana e intervalo geral                                     |        | 112,5 cm [70-190]              |  |  |  |
| Abertura  | Muito aberta (Mt A)   | 33,3%  | Mediana e intervalo por classe | 30 mm [10-50]  | 50%<br>25%<br>0%<br><br>MTA A F                        |  |
|   | Aberta (A)  | 33,3%  |                                | 2 mm [0,7-2,5]   |  |  |
|   | Fechada (F)   | 33,3%  |                                | 0,1 mm [0,1-0,2]   |  |  |
|   | Mediana e intervalo geral                                     |        | 2 mm [0,7-2,5]                 |  |  |  |
| Tipo de enchimento                                      | Argila Dura (Arg. D.)   | 48,3%  |                                | 50%<br>25%<br>0%<br><br>Arg D Arg M TV N                         |  |  |
|   | Argila Mole (Arg. M.)   | 3,4%   |                                |  |  |  |
|   | Terra Vegetal (TV)  | 20,7%  |                                |  |  |  |
|   | Nenhum (N)  | 27,6%  |                                |  |  |  |
| Rugosidade  | R3  | 100,0% |                                | 100%<br>50%<br>0%<br><br>R3                                      |  |  |
|   | Denteada (D)  | 3,7%   |                                | 100%<br>50%<br>0%<br><br>D O                                     |  |  |
|   | Ondulada (O)  | 96,3%  |                                |  |  |  |
| Continuidade  | Muito pouco contínua (MPC)                                    | 11,1%  | Mediana e intervalo por classe | 0,4 m [0,2-0,8]  | 100%<br>75%<br>50%<br>25%<br>0%<br><br>MPC PC MC C MTC |  |
|   | Pouco contínua (PC)   | 22,2%  |                                | 2,05 m [1,5-2,7]   |  |  |
|   | Mediana/ contínua (MC)  | 59,3%  |                                | 5,2 m [3-8,7]  |  |  |
|   | Contínua (C)  | 3,7%   |                                | 13,2 m   |  |  |
|   | Muito contínua (MTC)  | 3,70%  |                                | 21,2 m   |  |  |
|   | Mediana e intervalo geral                                     |        | 3,2 m [3-8,7]                  |  |  |  |
| Terminação  | Descontinuidade (D)   | 55,6%  |                                | 100%<br>50%<br>0%<br><br>D O                                     |  |  |
|   | Obscura (O)   | 44,4%  |                                |  |  |  |
| Curvatura   | C1-2  | 85,2%  |                                | 100%<br>85,2%<br>11,1%<br>3,7%<br>0%<br><br>C1-2 C3 C4-5         |  |  |
|   | C3  | 11,1%  |                                |  |  |  |
|   | C4-5  | 3,7%   |                                |  |  |  |
| Presença de água  | Seco  | 7,4%   |                                | 100%<br>7,4%<br>88,9%<br>3,7%<br>0%<br><br>Seco Húmido Gotejante |  |  |
|   | Húmido  | 88,9%  |                                |  |  |  |
|   | Gotejante   | 3,7%   |                                |  |  |  |
| Resistência à compressão uniaxial                       | S1-2  | 14%    | Mediana e intervalo por classe | 128,3 MPa  | 100%<br>14,3%<br>85,7%<br>0%<br><br>S1-2 S3            |  |
|   | S3  | 85,7%  |                                | 32,9 MPa [22-53,2]   |  |  |
|   | Mediana e intervalo geral                                     |        |                                | 35,2 MPa [22-53,2]   |  |  |
| RQDt  | Valor do limite inferior do intervalo                         | 60%    |                                |  |  |  |
|   | Mediana   | 75%    |                                |  |  |  |



→ **Zona geotécnica 3 (ZG3)**

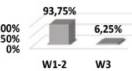
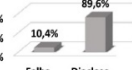
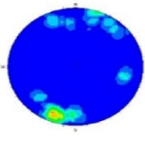
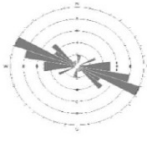
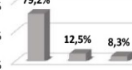
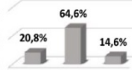
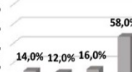
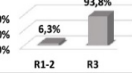
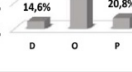
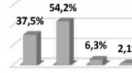
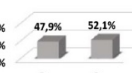
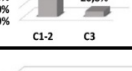
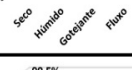
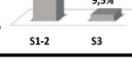
Esta zona é a que tem a maior extensão, com 112 m, apresentando uma orientação média de N06°E; 74°NW (Figura 50). No Quadro 20 apresenta-se uma síntese dos parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos resultantes do levantamento de campo.

Nesta zona, o maciço apresenta-se, fundamentalmente, ligeiramente alterado ( $W_{1-2}$ ). Foram registados 48 planos de descontinuidades, correspondendo maioritariamente a diaclases. Foi possível definir três famílias principais, sendo uma dominante N80°- 110°E;75°- 90°SE/NE e as restantes N110°-140°E;75°- 90°NE/SW e N0°- 20°E;70°-75°NW. As descontinuidades apresentam-se principalmente afastadas ( $F_{1-2}$ ), com uma mediana global de 150 cm. Ocorrem abertas e principalmente sem preenchimento, são algo rugosas ( $R_3$ ) e onduladas. Em termos de continuidade são medianamente contínuas, planas a pouco curvas ( $C_{1-2}$ ) e com terminações que podem ser obscuras ou noutras descontinuidades. Em termos de presença de água o maciço encontra-se húmido, sendo de salientar a existência de zonas gotejantes e mesmo fluxo. Foram realizadas 21 estações geomecânicas, as quais conduziram a uma resistência à compressão uniaxial elevada ( $S_2$ ), com uma mediana estimada em 76 MPa.



**Figura 50** - Aspetos gerais da Zona Geotécnica 3: A) vista do maciço rochoso cartografado; B) família de descontinuidades sub-paralela ao talude (NNE-SSW) e compartimentação em grande do maciço com blocometria típica romboédrica a prismática na qual se evidencia as descontinuidades sub-horizontais; C) zona do talude muito húmida e com muita vegetação; D) pormenor da foto reproduzida em C), onde se observa a escorrência, por vezes, com fluxo de água.

**Quadro 20** - Quadro-síntese de todos os parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos (segundo a ISRM, 1978, 1981) do maciço da Zona Geotécnica 3 (ZG3).

| Talude S. Cristóvão (Cinfães) - Zona Geotécnica 3 (ZG3) |   |   |                                |  |  |  |
|---|---|---|--------------------------------|--|--|--|
| PARÂMETROS GEOLÓGICO - GEOTÉCNICOS                      |   |   |                                |  |  |  |
| Litologia   | Granito predominantemente biotítico, de grão médio  |   |                                |  |  |  |
| Grau de alteração                                       | W1-2  | 93,7%   |                                |  |  |  |
|   | W3  | 6,3%  |                                |  |  |  |
| Total de descontinuidades                               | 48  |   |                                |  |  |  |
| Tipo de descontinuidade                                 | Falha   | 10,4%   |                                |  |  |  |
|   | Diaclase  | 89,6%   |                                |  |  |  |
| Principais famílias de descontinuidades                 | N 80° - 110° E; 75° - 90° SE/NE<br>N 110° - 140° E; 75° - 90° NE/SW<br>N 0° - 20° E; 70° - 75° NW |  |                                |  |  |  |
| Espaçamento/ "Fracture Intercept"                       | F1-2  | 79,2%   | Mediana e intervalo por classe | 220 cm [60-740]  |    |  |
|   | F3  | 12,5%   |                                | 45 cm [20-60]  |  |  |
|   | F4-5  | 8,3%  |                                | 14 cm [8-20]   |  |  |
|   | Mediana e intervalo geral   |   |                                | 150 cm [60-187]  |  |  |
| Abertura  | Muito aberta (Mt. A.)   | 20,8%   | Mediana e intervalo por classe | 20 mm [15-35]  |    |  |
|   | Aberta (A)  | 64,6%   |                                | 5 mm [3-10]  |  |  |
|   | Fechada (F)   | 14,6%   |                                | 0,05 mm [0-0,1]  |  |  |
|   | Mediana e intervalo geral   |   |                                | 5 mm [3-10]  |  |  |
| Tipo de enchimento                                      | Argila Dura (Arg. D.)   | 14,0%   |                                |  |  |  |
|   | Cataclasito/Milonito (C/M)  | 12,0%   |                                |  |  |  |
|   | Terra Vegetal (TV)  | 16,0%   |                                |  |  |  |
|   | Nenhum (N)  | 58,0%   |                                |  |  |  |
| Rugosidade  | R1-2  | 6,3%  |                                |  |  |  |
|   | R3  | 93,7%   |                                |  |  |  |
|   | Denteada (D)  | 14,6%   |                                |  |  |  |
|   | Ondulada (O)  | 64,6%   |                                |  |  |  |
|   | Plana (P)   | 20,8%   |                                |  |  |  |
| Continuidade  | Pouco contínua (P.C.)   | 37,5%   | Mediana e intervalo por classe | 2,15 m [1,3-3]   |  |  |
|   | Mediana/ contínua (M.C.)  | 54,2%   |                                | 3,8 m [3,1-7,2]  |  |  |
|   | Contínua (C)  | 4,2%  |                                | 16,4 m [16,2-16,5]   |  |  |
|   | Muito contínua (MT.C.)  | 2,10%   |                                | 21,6 m   |  |  |
|   | Mediana e intervalo geral   |   |                                | 3 m [3-7,2]  |  |  |
| Terminação  | Descontinuidade (D)   | 47,9%   |                                |  |  |  |
|   | Obscura (O)   | 52,1%   |                                |  |  |  |
| Curvatura   | C1-2  | 79,2%   |                                |  |  |  |
|   | C3  | 20,8%   |                                |  |  |  |
| Presença de água  | Seco  | 20,8%   |                                |  |  |  |
|   | Húmido  | 54,2%   |                                |  |  |  |
|   | Gotejante   | 12,5%   |                                |  |  |  |
|   | Fluxo   | 12,5%   |                                |  |  |  |
| Resistência à compressão uniaxial                       | S1-2  | 90,5%   | Mediana e intervalo por classe | 76,2 MPa [64,4-165,9]  |  |  |
|   | S3  | 9,5%  |                                | 39,6 MPa [36,7-42,4]   |  |  |
|   | Mediana e intervalo geral   |   |                                | 76,2 MPa [64,4-165,9]  |  |  |
| RQDt  | Valor do limite inferior do intervalo   | 55%   |                                |  |  |  |
|   | Mediana   | 85%   |                                |  |  |  |



→ **Zona geotécnica 4 (ZG4)**

Esta zona tem uma extensão de 56 m, apresentando uma orientação média de N42°E; 74°NW (Figura 51). No Quadro 21 apresenta-se uma síntese dos parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos resultantes do levantamento de campo.

Nesta zona, o maciço apresenta-se, fundamentalmente, ligeiramente alterado ( $W_{1-2}$ ). Foram registados 31 planos de descontinuidades, correspondendo maioritariamente a diaclases. Foi possível definir três famílias principais, sendo uma dominante N 60°- 90°E; 65°- 85°SE/NW e as restantes N110°-140°E; 60°- 85°NE e N15°- 45°E; 70°- 85°NW. No que diz respeito ao espaçamento, as descontinuidades são afastadas ( $F_{1-2}$ ), com uma mediana global de 170 cm. Ocorrem muito abertas a abertas, predominantemente sem preenchimento, mas quando este existe é constituído por argila dura. Em termos de rugosidade são descontinuidades algo rugosas ( $R_3$ ) e fundamentalmente onduladas. Em termos de continuidade são medianamente contínuas, planas a pouco curvas ( $C_{1-2}$ ) e com terminações principalmente obscuras. Quanto à presença de água, oscilam entre o gotejante e o húmido, podendo mesmo ocorrer fluxo. Foram realizadas 7 estações geomecânicas, as quais conduziram a uma resistência à compressão uniaxial elevada ( $S_2$ ), com uma mediana estimada em 135 MPa.



**Figura 51** - Aspetos gerais da Zona Geotécnica 4: A) vista do topo superior do maciço rochosos cartografado onde se observa o grau de compartimentação do maciço e rotura mais típica associada (planar), com geometria prismática; B), C) compartimentação em grande do maciço, evidenciando-se os potenciais tipos de rotura (por cunha); D) pormenor de caixa de falha do sistema análogo à falha regional do Carrapatelo (Teixeira et al., 1968; Teixeira, 1973).

**Quadro 21** - Quadro-síntese de todos os parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos (segundo a ISRM, 1978, 1981) do maciço da Zona Geotécnica 4 (ZG4).

| Talude S. Cristóvão (Cinfães) - Zona Geotécnica 4 (ZG4) |  |       |                                |                  |  |  |
|---|--|-------|--------------------------------|------------------|--|--|
| PARÂMETROS GEOLÓGICO - GEOTÉCNICOS                      |  |       |                                |                  |  |  |
| Litologia   | Granito predominantemente biotítico, de grão médio   |       |                                |                  |  |  |
| Grau de alteração                                       | W1-2   | 96,8% |                                |                  |  |  |
|   | W3   | 3,2%  |                                |                  |  |  |
| Total de descontinuidades                               | 31   |       |                                |                  |  |  |
| Tipo de descontinuidade                                 | Falha  | 3,2%  |                                |                  |  |  |
|   | Diaclase   | 96,8% |                                |                  |  |  |
| Principais famílias de descontinuidades                 | N 60° - 90° E; 65° - 85° SE/NW<br>N 110° - 140° E; 60° - 85° NE<br>N 15° - 45° E; 70° - 85° NW |       |                                |                  |  |  |
| Espaçamento/ "Fracture intercept"                       | F1-2   | 83,9% | Mediana e intervalo por classe | 180 cm [60-197]  |  |  |
|   | F3   | 3%    |                                | 40 cm            |  |  |
|   | F4-5   | 13%   |                                | 10 cm [3-10]     |  |  |
|   | Mediana e intervalo geral  |       | 170 cm [60-197]                |                  |  |  |
| Abertura  | Muito aberta (MtA)   | 58,1% | Mediana e intervalo por classe | 30 mm [15-60]    |  |  |
|   | Aberta (A)   | 41,9% |                                | 10 mm [5-10]     |  |  |
|   | Mediana e intervalo geral  |       | 20 mm [10-60]                  |                  |  |  |
| Tipo de enchimento                                      | Argila Dura (Arg D)  | 22,6% |                                |                  |  |  |
|   | Cataclasito/Milonito (C/M)   | 3,2%  |                                |                  |  |  |
|   | Nenhum (N)   | 74,2% |                                |                  |  |  |
| Rugosidade  | R1-2   | 9,7%  |                                |                  |  |  |
|   | R3   | 90,3% |                                |                  |  |  |
|   | Ondulada (O)   | 61,3% |                                |                  |  |  |
|   | Plana (P)  | 38,7% |                                |                  |  |  |
| Continuidade  | Pouco contínua (PC)  | 6,5%  | Mediana e intervalo por classe | 2,6 m            |  |  |
|   | Medianamente contínua (MC)   | 90,3% |                                | 6,05 m [3,5-9,5] |  |  |
|   | Contínua (C)   | 3,2%  |                                | 10,5 m           |  |  |
|   | Mediana e intervalo geral  |       | 6 m [3,5-9,5]                  |                  |  |  |
| Terminação  | Descontinuidade (D)  | 19,4% |                                |                  |  |  |
|   | Obscura (O)  | 80,6% |                                |                  |  |  |
| Curvatura   | C1-2   | 83,9% |                                |                  |  |  |
|   | C3   | 12,9% |                                |                  |  |  |
|   | C4-5   | 3,2%  |                                |                  |  |  |
| Presença de água  | Seco   | 6,5%  |                                |                  |  |  |
|   | Húmido   | 32,3% |                                |                  |  |  |
|   | Gotejante  | 38,7% |                                |                  |  |  |
|   | Fluxo  | 22,6% |                                |                  |  |  |
| Resistência à compressão uniaxial                       | S1-2   | 100%  |                                |                  |  |  |
|   | Mediana e intervalo geral  |       | 135,5 MPa [114,9-180,8]        |                  |  |  |
| RQDt  | Valor do limite inferior do intervalo  |       | 55%                            |                  |  |  |
|   | Mediana  |       | 90%                            |                  |  |  |



→ **Zona geotécnica 5 (ZG5)**

Esta zona tem uma extensão de 45 m, apresentando uma orientação média de N20°E; 74°NW (Figura 52). No Quadro 22 apresenta-se uma síntese dos parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos resultantes do levantamento de campo.

Nesta zona, o maciço apresenta-se, fundamentalmente, moderadamente alterado ( $W_3$ ), ocorrendo muito alterado a decomposto ( $W_{4-5}$ ) no troço final. Foram registados 13 planos de descontinuidades, correspondendo maioritariamente a diaclases. Identificaram-se duas famílias principais, sendo a dominante N100°- 140°E;75°- 90°NE/SW e a outra N60°- 90°E;80°- 90°NW/SE. Em termos de espaçamento, as descontinuidades são afastadas ( $F_{1-2}$ ), com uma mediana global de 240 cm. Em termos de abertura, estas são muito abertas a abertas, globalmente sem enchimento, mas quando este existe é fundamentalmente constituído por argila dura e mole. No geral, as descontinuidades apresentam-se algo rugosas ( $R_3$ ) e onduladas. Em termos de continuidade são principalmente medianamente contínuas, planas a pouco curvas ( $C_{1-2}$ ) e com terminações obscuras. Quanto à presença de água, o maciço encontra-se húmido e muitas vezes gotejante. Foram realizadas 5 estações geomecânicas, as quais conduziram a uma resistência à compressão uniaxial média ( $S_3$ ), com a mediana a rondar os 33 MPa.



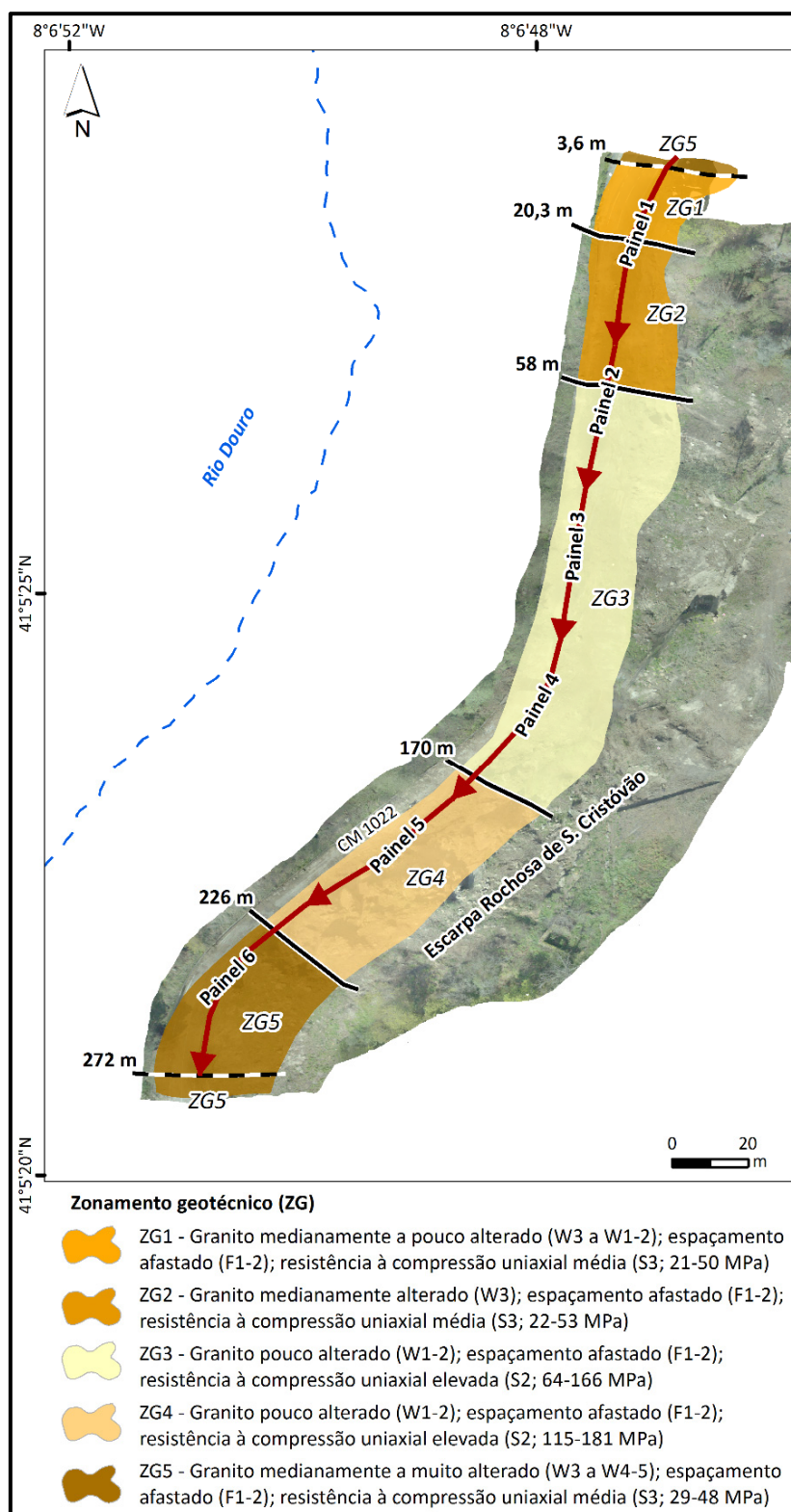
**Figura 52** - Aspectos gerais da Zona Geotécnica 5: A), B), C) vista geral do maciço rochoso muito alterado e por vezes com passagens medianamente alteradas (ver foto D); D) pormenor do grau de alteração típico da maior parte do maciço ( $W_{4-5}$ ), encontrando-se muito arenizado e argiloso, de tons amarelados.

**Quadro 22** - Quadro-síntese de todos os parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos (segundo a ISRM, 1978, 1981) do maciço da Zona Geotécnica 5 (ZG5).

| Talude S. Cristóvão (Cinfães) - Zona Geotécnica 5 (ZG5) |  |                      |                                |                      |  |  |
|---|--|----------------------|--------------------------------|----------------------|--|--|
| PARÂMETROS GEOLÓGICO - GEOTÉCNICOS                      |  |                      |                                |                      |  |  |
| Litologia   | Granito predominantemente biotítico, de grão médio                     |                      |                                |                      |  |  |
| Grau de alteração                                       | W1-2   | 7,7%                 |                                |                      |  |  |
|   | W3   | 69,2%                |                                |                      |  |  |
|   | W4-5   | 23,1%                |                                |                      |  |  |
| Total de descontinuidades                               | 13   |                      |                                |                      |  |  |
| Tipo de descontinuidade                                 | Falha  | 15,4%                |                                |                      |  |  |
|   | Diaclase   | 84,6%                |                                |                      |  |  |
| Principais famílias de descontinuidades                 | N 100° - 140° E; 75° - 90° NE (SW)<br>N 60° - 90° E; 80° - 90° NW (SE) |                      |                                |                      |  |  |
| Espaçamento/ "Fracture intercept"                       | F1-2   | 100,0%               |                                |                      |  |  |
|   | Mediana e intervalo geral  | 240 cm [225-465]     |                                |                      |  |  |
| Abertura  | Muito aberta (MtA)   | 53,8%                | Mediana e intervalo por classe | 50 mm [20-70]        |  |  |
|   | Aberta (A)   | 38,5%                |                                | 5 mm [5-10]          |  |  |
|   | Fechada (F)  | 7,7%                 |                                | 0,0 mm               |  |  |
|   | Mediana e intervalo geral  | 20 mm [10-70]        |                                |                      |  |  |
| Tipo de enchimento                                      | Argila Dura (Arg D)  | 28,6%                |                                |                      |  |  |
|   | Argila Mole (Arg M)  | 7,1%                 |                                |                      |  |  |
|   | Cataclasto/Milonito (C/M)  | 7,1%                 |                                |                      |  |  |
|   | Terra Vegetal (TV)   | 7,1%                 |                                |                      |  |  |
|   | Nenhum (N)   | 50,0%                |                                |                      |  |  |
| Rugosidade  | R3   | 69,2%                |                                |                      |  |  |
|   | R4-5   | 30,8%                |                                |                      |  |  |
|   | Ondulada (O)   | 76,9%                |                                |                      |  |  |
|   | Plana (P)  | 23,1%                |                                |                      |  |  |
| Continuidade  | Pouco contínua (PC)  | 23,1%                | Mediana e intervalo por classe | 1,6 m [1,6-2,6]      |  |  |
|   | Mediana/ contínua (MC)   | 76,9%                |                                | 3,9 m [3,1-5,6]      |  |  |
|   | Mediana e intervalo geral  | 3,6 m [3,1-5,6]      |                                |                      |  |  |
| Terminação  | Descontinuidade (D)  | 7,7%                 |                                |                      |  |  |
|   | Obscura (O)  | 92,3%                |                                |                      |  |  |
| Curvatura   | C1-2   | 92,3%                |                                |                      |  |  |
|   | C3   | 7,7%                 |                                |                      |  |  |
| Presença de água  | Seco   | 30,8%                |                                |                      |  |  |
|   | Húmido   | 46,2%                |                                |                      |  |  |
|   | Gotejante  | 15,4%                |                                |                      |  |  |
|   | Fluxo  | 7,7%                 |                                |                      |  |  |
| Resistência à compressão uniaxial                       | S1-2   | 20%                  | Mediana e intervalo por classe | 61,2 MPa             |  |  |
|   | S3   | 60%                  |                                | 32,7 MPa [28,6-48,3] |  |  |
|   | S4-5   | 20%                  |                                | 19,2 MPa             |  |  |
|   | Mediana e intervalo geral  | 32,7 MPa [28,6-48,3] |                                |                      |  |  |

### 3.5.4. Cartografia do zonamento geotécnico

Conjugando toda a informação anterior e as investigações geológico-geotécnicas realizadas no terreno foi possível definir uma cartografia de zonamento geotécnico para o talude de S. Cristóvão (Figura 53).



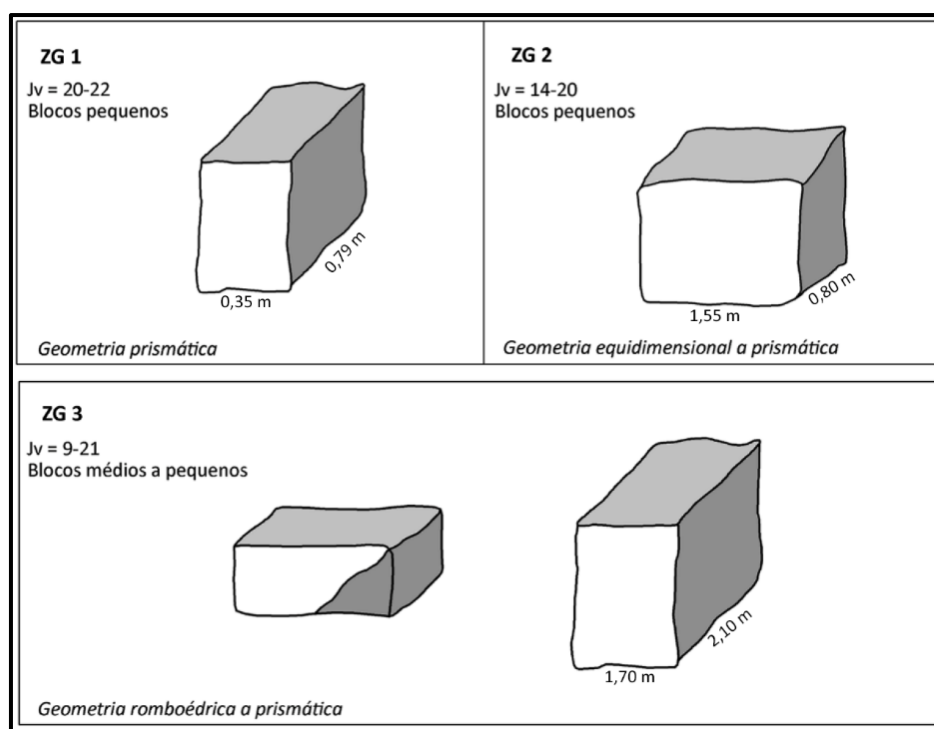
**Figura 53** - Cartografia de zonamento geotécnico para a escarpa rochosa de S. Cristóvão (Cinfães).



### 3.5.5. Definição da blocometria geral

A importância da determinação do bloco unitário dos maciços rochosos é significativa (Gonzalez de Vallejo & Ferrer, 2011). A dimensão dos blocos que formam o maciço rochoso condiciona o seu comportamento, as suas propriedades de resistência e a sua deformabilidade. A forma do bloco unitário é determinada, em regra, a partir da orientação das descontinuidades e do número de famílias, enquanto a dimensão dos blocos é determinada pelo seu espaçamento, continuidade e número de famílias de descontinuidades. A determinação do tamanho dos blocos pode ser realizada de diversas formas, entre as quais através do parâmetro  $J_v$  (*volumetric joint count*). Este parâmetro representa o número total de descontinuidades que intersectam uma unidade de volume ( $1 \text{ m}^3$ ) de um dado maciço rochoso (ISRM, 1978; Palmström, 2005; Gonzalez de Vallejo & Ferrer, 2011). Recentemente, Palmström (2005) propôs uma nova correlação entre o RQD e o  $J_v$  ( $RQD = 110 - 2.5 \times J_v$ ) que permite uma modelação blocométrica com um bom grau de fiabilidade.

No que diz respeito à zona geotécnica 1 (ZG1), a dimensão dos blocos é pequena, uma vez que o  $J_v$  varia entre 20 e 22 descontinuidades/ $\text{m}^3$ . Quanto à zona geotécnica 2 (ZG2), a dimensão dos blocos é, igualmente pequena, com um  $J_v$  a variar entre 14 e 20 descontinuidades/ $\text{m}^3$ . Por seu turno, nas zonas geotécnicas 3 (ZG3) e 4 (ZG4) os blocos são médios a pequenos, com  $J_v$  a variar, respetivamente, entre 9 e 21 descontinuidades/ $\text{m}^3$  e 8 a 22 descontinuidades/ $\text{m}^3$ . A Figura 54 ilustra de forma esquemática a geometria típica dos blocos rochosos para as zonas geotécnicas 1, 2, 3 e 4.



**Figura 54** - Geometria típica dos blocos rochosos nas zonas geotécnicas 1, 2, 3 e 4.



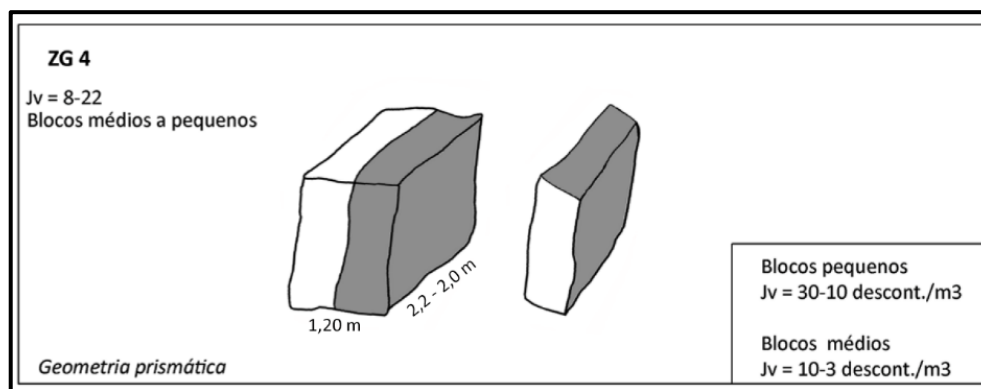


Figura 54 – (continuação).

### 3.6. Classificações geomecânicas

#### 3.6.1. Geomecânica dos maciços rochosos

De modo a avaliar a competência do maciço rochoso do talude de S. Cristóvão aplicaram-se três classificações geomecânicas: “Rock Mass Rating [RMR]” (Bieniawski, 1989, 1993; Celada et al., 2014), “Slope Mass Rating [SMR]” (Romana, 1985, 1993, 1997) e “Geological Strength Index [GSI – versões 1998 e 2013]” (Hoek et al., 1998; Marinos & Hoek, 2000; Marinos et al., 2005; Hoek et al., 2013; Santa et al., 2013). No Quadro 23 apresenta-se a síntese dos resultados das três classificações aplicadas às cinco zonas geotécnicas da escarpa de S. Cristóvão.

De acordo com a análise das classificações aplicadas, a zona geotécnica 1 classifica-se de qualidade razoável a fraca, a zona geotécnica 2 de qualidade razoável a fraca, a zona geotécnica 3 de qualidade razoável, a zona geotécnica 4 de qualidade fraca a razoável e a zona geotécnica 5 de qualidade fraca a muito fraca.

**Quadro 23** – Síntese das características das cinco zonas geotécnicas do talude de S. Cristóvão, de acordo com as classificações geomecânicas RMR, SMR e GSI.

|                   |     | Classificações geomecânicas                                   |   |                                    |                                    |
|-------------------|-----|---|---|------------------------------------|------------------------------------|
|                   |     | RMR<br>(Bieniawski, 1989)                                     | SMR<br>(Romana, 1985, 1993)                               | GSI   1998<br>(Hoek et al., 1998)  | GSI   2013<br>(Hoek et al., 2013)  |
| Zonas geotécnicas | ZG1 | 35  | 45  | 45 - 55                            | 40                                 |
|                   |     | Maciço de qualidade fraca (Classe IV) a razoável (Classe III) | Maciço de qualidade razoável (Classe IIIb)                | Maciço de qualidade razoável       | Maciço de qualidade razoável       |
|                   | ZG2 | 45  | 57  | 55 - 65                            | 52                                 |
|                   |     | Maciço de qualidade razoável (Classe III) a fraca (Classe IV) | Maciço de qualidade razoável (Classe IIIa)                | Maciço de qualidade razoável a boa | Maciço de qualidade razoável       |
|                   | ZG3 | 49  | 46  | 45 - 55                            | 54                                 |
|                   |     | Maciço de qualidade razoável (Classe III)                     | Maciço de qualidade razoável (Classe IIIb)                | Maciço de qualidade razoável       | Maciço de qualidade razoável       |
|                   | ZG4 | 51  | 26  | 55 - 65                            | 56                                 |
|                   |     | Maciço de qualidade razoável (Classe III)                     | Maciço de qualidade fraca (Classe IVb)                    | Maciço de qualidade razoável a boa | Maciço de qualidade razoável a boa |
|                   | ZG5 | 46  | 20  | Não aplicável                      |                                    |
|                   |     | Maciço de qualidade razoável (Classe III) a fraca (Classe IV) | Maciço de qualidade fraca a muito fraca (Classe IVb a Va) |                                    |                                    |

### 3.6.2. Parâmetros geomecânicos adotados

Tendo em vista a necessidade da obtenção dos parâmetros geológico-geotécnicos para a introdução nos respectivos modelos geomecânicos, apresenta-se nos Quadros 24 e 25 uma síntese de alguns parâmetros geomecânicos necessários na utilização dos modelos de cálculo.

**Quadro 24** – Resumo dos parâmetros geomecânicos estimados para o talude de S. Cristóvão.

| Zonas geotécnicas | Litologia  | Resistência à Compressão Uniaxial, UCS (MPa) | Peso volúmico, $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) |
|-------------------|--|--|--|
| ZG1               | Granito predominantemente biotítico, de grão médio | $S_3$ : 46,9 [21 - 50]                       | 26   |
| ZG2               |  | $S_3$ : 35,2 [22 - 53]                       |  |
| ZG3               |  | $S_2$ : 76,2 [64 - 166]                      |  |
| ZG4               |  | $S_2$ : 135,5 [115 - 181]                    |  |
| ZG5               |  | $S_3$ : 32,7 [29 - 48]                       |  |

**Quadro 25** – Valores de coesão (c), ângulo de atrito ( $\phi$ ) e parâmetro da rocha intacta ( $m_i$ ) para o maciço do talude de S. Cristóvão.

| Zonas geotécnicas | Litologia  | Coesão, c (MPa)<br>(Gonzalez de Vallejo & Ferrer, 2011) | Ângulo de atrito, $\phi$ (°)<br>(Gonzalez de Vallejo & Ferrer, 2011) | $m_i$<br>(Hoek, 2007) |
|-------------------|--|---|--|-----------------------|
| ZG1               | Granito predominantemente biotítico, de grão médio | 15 - 50   | 40 - 50  | 33                    |
| ZG2               |  |   |  |                       |
| ZG3               |  |   |  |                       |
| ZG4               |  |   |  |                       |
| ZG5               |  |   |  |                       |

### 3.6.3. Cartografia do zonamento geomecânico

A Figura 55 ilustra a cartografia de zonamento geomecânico, evidenciando três zonas geomecânicas, ZGM1, ZGM2 e ZGM3, da escarpa rochosa de S. Cristóvão. Esta cartografia foi realizada com base nos valores das classificações geomecânicas estudadas anteriormente (RMR, SMR e GSI), principalmente na SMR.

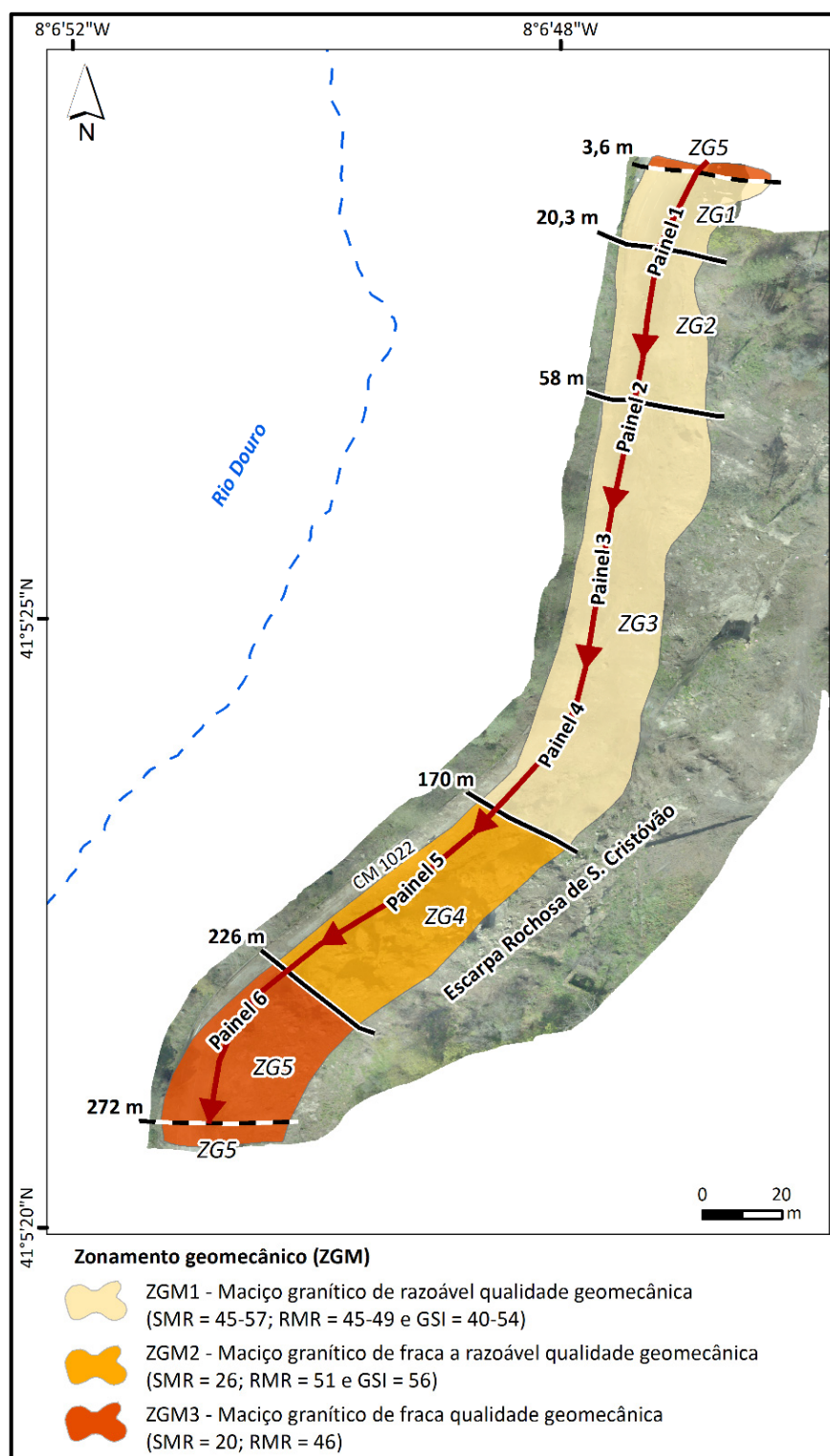


Figura 55 – Cartografia de zonamento geomecânico da escarpa rochosa de S. Cristóvão.

---

### 3.7. Definição do modelo tridimensional da Escarpa de S. Cristóvão

Para apoiar o estudo da escarpa rochosa de S. Cristóvão foi desenvolvido um modelo tridimensional com base num conjunto de imagens aéreas, recorrendo, para o efeito, ao auxílio de um veículo aéreo não tripulado vulgarmente designado de “*drone*”.

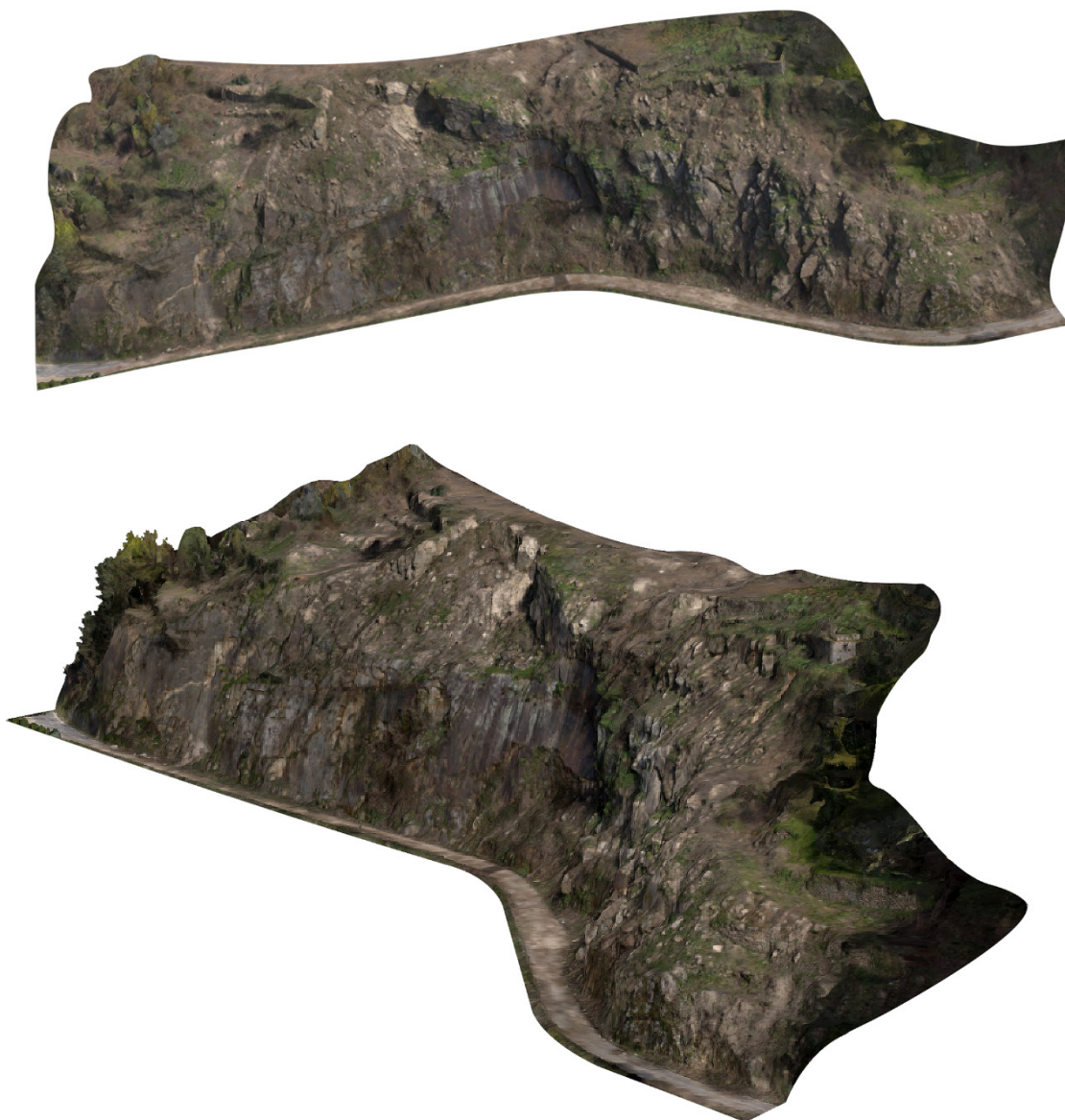
Como foi referido no Capítulo 1, foram efetuados disparos a cada 2s e foram realizados voos que se verificaram necessários para a obtenção de imagens com uma sobreposição superior a 60%. Este aspeto é bastante importante, dado que a qualidade do modelo tridimensional resultante se encontra fortemente relacionada com a percentagem de sobreposição das imagens obtidas.

Foram, também, georreferenciados alguns pontos ao longo da escarpa, que juntamente com as imagens obtidas nos voos do “*drone*” e posteriormente aplicados a um programa comercial específico para a apresentação de modelos tridimensionais, obtém-se resultados bastantes satisfatórios e ajustados à finalidade a que se destinam. Sendo assim, no modelo apresentado conseguiu-se uma resolução na ordem do 1cm/pixel.

Este modelo tridimensional da escarpa de S. Cristóvão revelou-se uma mais valia para o presente estudo pois serviu de auxílio para as modelações no *Swedge* e no *Rocfall*, permitindo, a obtenção de perfis transversais bastante rigorosos e ainda a caracterização dos materiais com um nível de fiabilidade.

Durante o desenvolvimento do modelo tridimensional foram surgindo, também, algumas dificuldades como, a existência da vegetação de densidade considerável, tornando-se indispensável a realização de outros voos após a remoção da vegetação da escarpa.

Na Figura 56 é possível visualizar algumas imagens do modelo tridimensional desenvolvido.



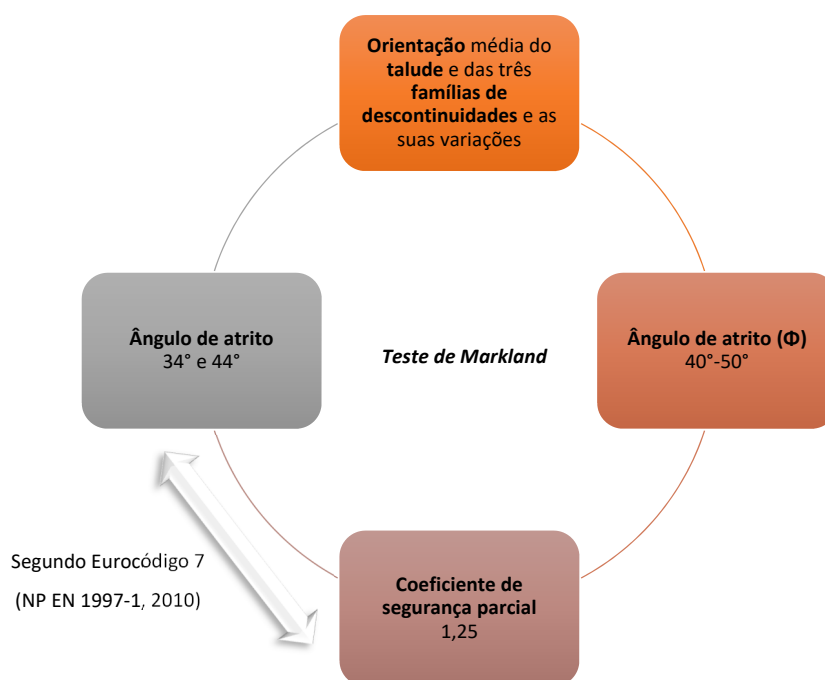
**Figura 56** – Modelo tridimensional geoestrutural da escarpa de S. Cristóvão (Cinfães).

### 3.8. Análise de estabilidade geoestrutural

#### 3.8.1. Teste de *Markland*

De acordo com as classes de estabilidade estabelecidas por Romana (1985, 1995, 1997), as zonas geotécnicas 1, 2, 3 e 5 são consideradas parcialmente estáveis, enquanto que a zona geotécnica 4 é considerada instável. Relativamente aos tipos de rotura prováveis, função do valor de SMR, nas zonas geotécnicas 1, 2, 3 e 5 poderão ocorrer alguns fenómenos de instabilidade; por seu turno, na zona geotécnica 4 poderão ocorrer muitos fenómenos de instabilidade, nomeadamente, roturas planares importantes, muitas roturas em cunha e mesmo diversos tombamentos.

Não obstante as propostas de estabilidade e tipos de rotura de Romana (1985, 1995, 1997), procedeu-se à caracterização da estabilidade do talude em cada uma das zonas geotécnicas em apreço baseada no designado “Teste de *Markland*” (Hoek & Bray, 1981; Wyllie & Mah, 2004; Wyllie, 2014). Nesta análise utilizaram-se os parâmetros demonstrados na Figura 57, sendo que os resultados obtidos são os apresentados na Figura 58.



**Figura 57** – Parâmetros usados na aplicação do teste de *Markland*.

É de salientar que, apesar de as descontinuidades sub-horizontais não terem sido integradas nesta análise de estabilidade, o seu papel pode, em muitos casos, ser importante como elemento instabilizador de diversos blocos rochosos.

---

### **Zona Geotécnica 1**

A análise da estabilidade (Figura 58A) relativa à zona ZG1 permite constatar que a segunda família de descontinuidades ( $F_2$ ) pode dar origem a roturas planares, uma vez que estas descontinuidades apresentam uma direção sub-paralela à do talude e inclinações direcionadas para o mesmo quadrante e por vezes superiores à do mesmo. Além disso, as intersecções das duas famílias de descontinuidades ( $F_1$  e  $F_2$ ) poderão dar origem a roturas em cunha, com sentidos de escorregamento efetivos para o quadrante NW, com uma atitude média de  $62^\circ/\text{N}323^\circ\text{E}$ .

### **Zona Geotécnica 2**

A análise da estabilidade (Figura 58B) relativa à zona ZG2 permite constatar que não é previsível a ocorrência de qualquer tipo de rotura.

### **Zona Geotécnica 3**

A análise da estabilidade (Figura 58C) relativa à zona ZG3 permite constatar que a terceira família de descontinuidades ( $F_3$ ) pode dar origem a roturas planares. Por outro lado, as intersecções das famílias de descontinuidades  $F_2$  e  $F_3$  poderão dar origem a roturas em cunha, com sentidos de escorregamento efetivos para o quadrante NW, com uma atitude média de  $64^\circ/\text{N}323^\circ\text{E}$  ( $S_1$ ). Além disso, as intersecções das famílias de descontinuidades  $F_1$  e  $F_3$  poderão dar origem, igualmente, a roturas em cunha, com sentidos de escorregamento efetivos para o quadrante NW, com uma atitude média de  $70^\circ/\text{N}294^\circ\text{E}$  ( $S_2$ ) e para o quadrante SW, com uma atitude média de  $64^\circ/\text{N}230^\circ\text{E}$  ( $S_3$ ).

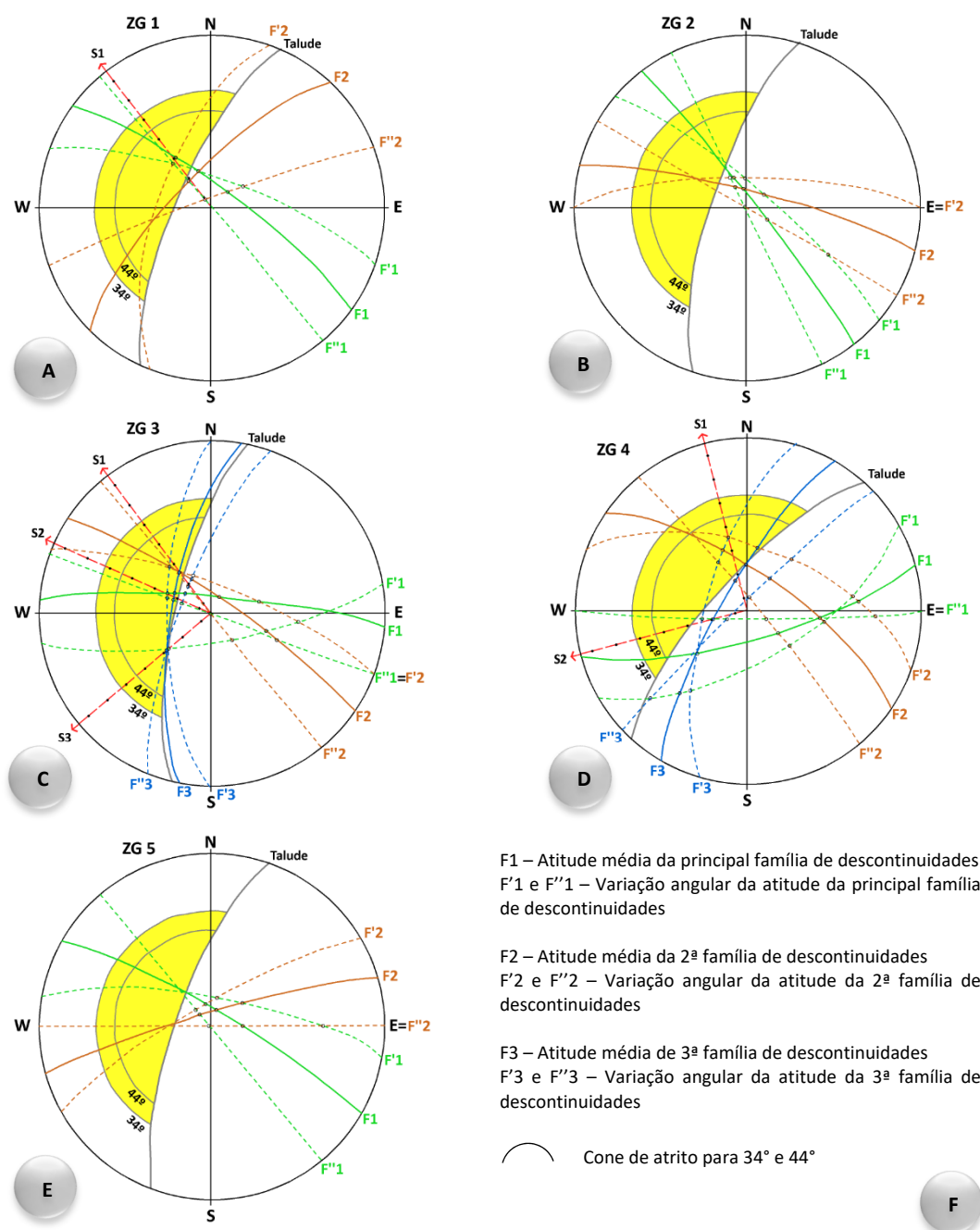
### **Zona Geotécnica 4**

Esta zona é mais crítica das cinco zonas geotécnicas. A análise da estabilidade (Figura 58D) permite constatar que poderão ocorrer:

- a) roturas por tombamento relacionadas com a família principal de descontinuidades ( $F_1$ ), uma vez que estas descontinuidades apresentam uma inclinação contrária à inclinação do talude e uma direção sub-paralela ao mesmo;
- b) roturas planares associadas à terceira família de descontinuidades ( $F_3$ );
- c) roturas em cunha associadas às famílias  $F_2$  e  $F_3$ , com sentidos de escorregamento efetivos para o quadrante NNW, com uma atitude média de  $64^\circ/\text{N}346^\circ\text{E}$  ( $S_1$ );
- d) roturas em cunha associadas às famílias  $F_1$  e  $F_3$ , com sentidos de escorregamento efetivos para o quadrante WSW, com uma atitude média de  $74^\circ/\text{N}256^\circ\text{E}$  ( $S_2$ ).

## Zona Geotécnica 5

A análise da estabilidade (Figura 58E) relativa à zona ZG5 permite constatar que não é previsível a ocorrência de qualquer tipo de rotura.



| Zonas geotécnicas | Atitudes médias do talude | Atitudes médias (F) das três famílias de descontinuidades |              |             | Atitudes dos sentidos médios de escorregamento efetivo |            |            |
|-------------------|---------------------------|---|--------------|-------------|--|------------|------------|
|                   |                           | F1  | F2           | F3          | S1   | S2         | S3         |
| ZG1               | N24°E;74°NW               | N126°E;80°NE  | N44°E;74°NW  | -           | 62°/N323°E   | -          | -          |
| ZG2               | N18°E;74°NW               | N142°E;86°NE  | N104°E;82°NE | -           | -  | -          | -          |
| ZG3               | N12°E;74°NW               | N94°E;82°NE   | N124°E;82°NE | N10°E;72°NW | 64°/N323°E   | 70°/N294°E | 64°/N230°E |
| ZG4               | N42°E;74°NW               | N74°E;76°SE   | N124°E;72°NE | N30°E;78°NW | 64°/N346°E   | 74°/N256°E | -          |
| ZG5               | N20°E;74°NW               | N120°E;82°NE  | N74°E;84°NW  | -           | -  | -          | -          |

**Figura 58** - Análise da estabilidade para a escarpa de S. Cristóvão: A) ZG1; B) ZG2; C) ZG3; D) ZG4; E) ZG5; F) atitudes médias e variações angulares das três famílias de descontinuidades e atitudes dos sentidos médios de escorregamento efetivo nas cinco zonas geotécnicas.

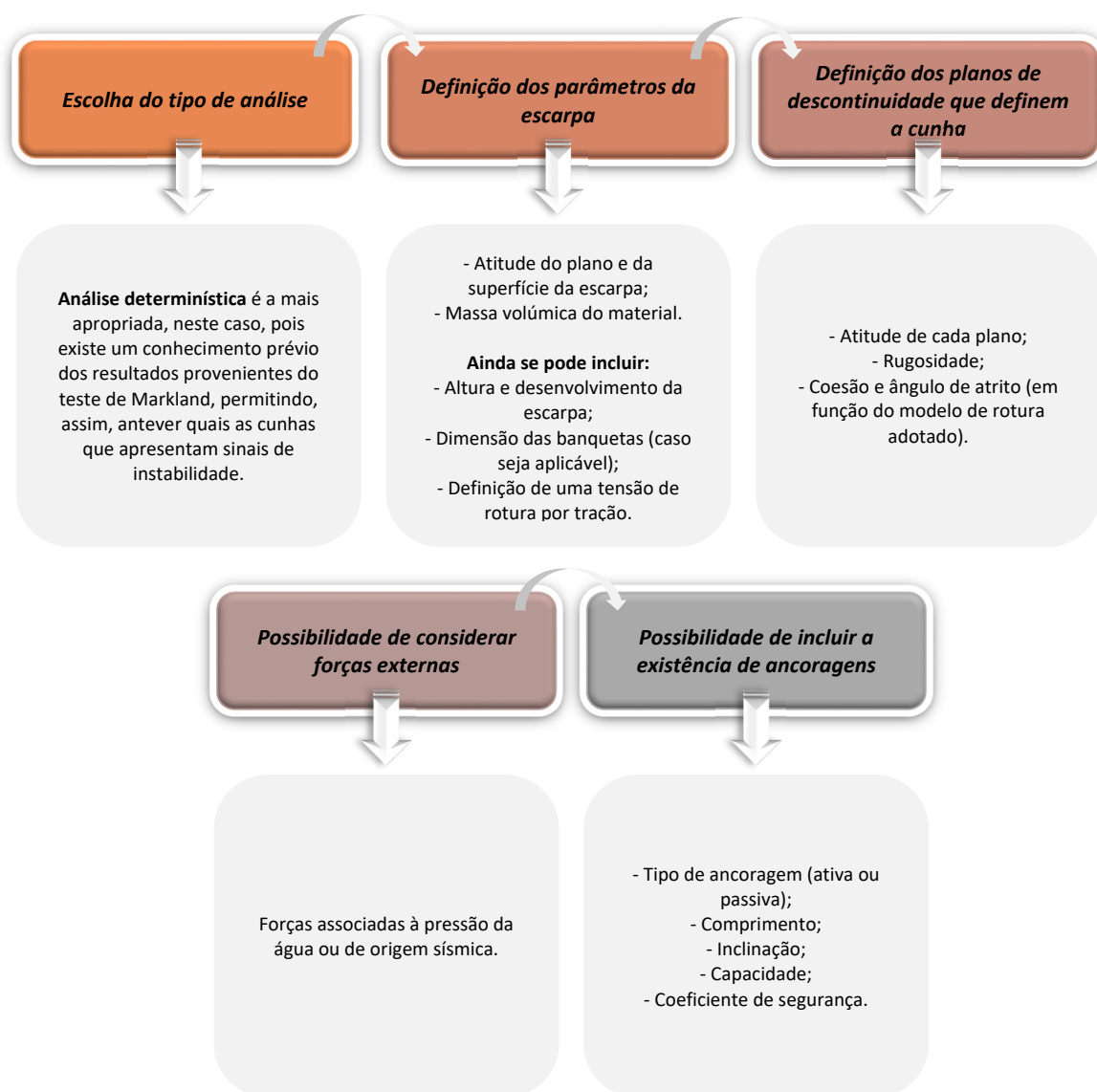


### 3.8.2. Modelação geotécnica de estabilidade de cunhas (*Swedge*) e queda de blocos (*RocFall*)

#### 3.8.2.1. Estabilidade de cunhas – *Swedge*

Com a finalidade de avaliar a estabilidade das cunhas resultantes da intersecção das inúmeras famílias de descontinuidades constituintes da escarpa de S. Cristóvão, recorreu-se ao programa de cálculo automático *Swedge* (versão 6.0). Este programa já foi abordado no capítulo anterior, onde foi possível explicar as três opções de análise, determinística, probabilística e por combinações. Tal como previamente referido pode ser consultado o trabalho de Ferraz (2016) onde esta temática se encontra aprofundada e desenvolvida.

Na Figura 59 pode-se visualizar as diversas etapas que envolve o cálculo da estabilidade das cunhas através do programa *Swedge*.

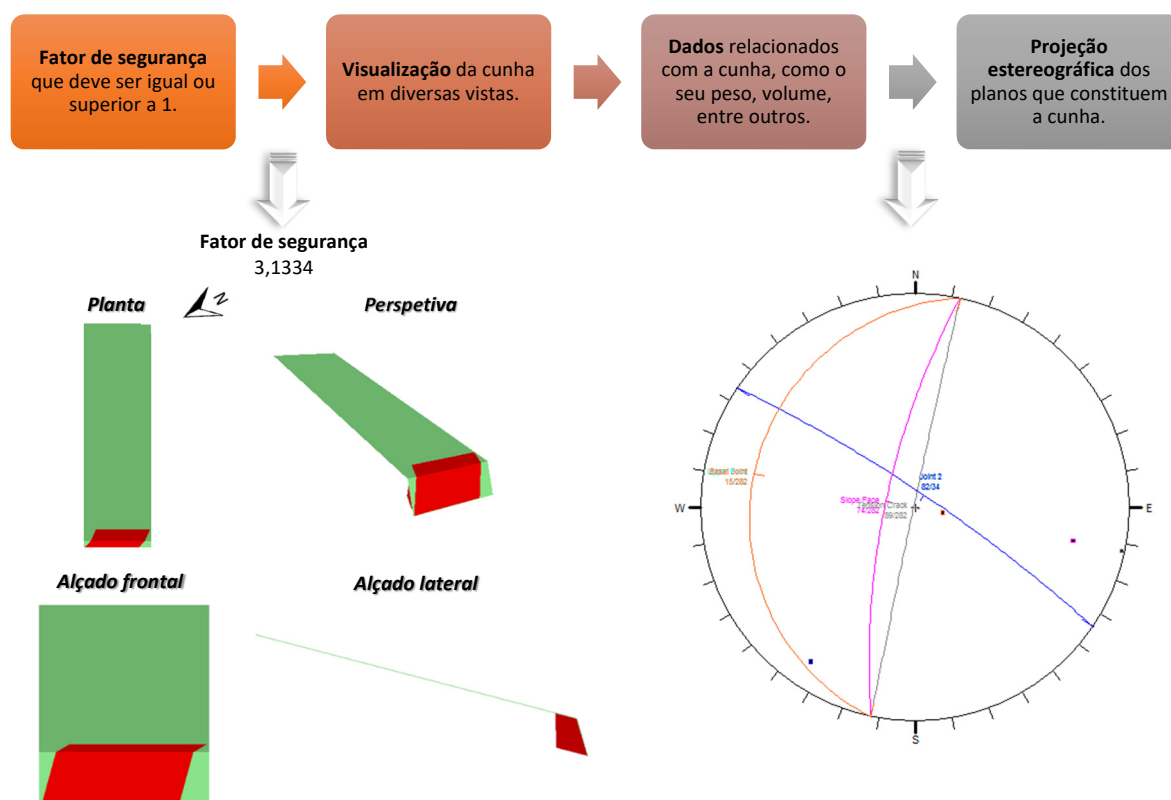


**Figura 59** - Procedimento para aplicação do programa *Swedge*.

Para o estudo da estabilidade de cunhas na escarpa de S. Cristóvão admitiram-se os seguintes dados:

- **Coesão = 0**, assumindo a situação mais desfavorável;
- **Ângulo de atrito ( $\Phi$ ) = 35°**, proveniente do intervalo 40°-50°;
- **Altura média do talude = 33m**.

Após a introdução dos dados, o programa devolve algumas informações importantes para a análise tipo determinística, como as apresentadas na Figura 60.



**Figura 60** - Informações obtidas após o cálculo da estabilidade das cunhas através do programa *Swedge*.

Para o estudo da estabilidade de cunhas das diversas zonas geotécnicas foram usadas as informações obtidas através do teste de *Markland*; assim, pode-se afirmar que as zonas geotécnicas ZG2 e ZG3 são aquelas em que exige um estudo mais aprofundado no que se refere à caracterização dos blocos, com o objetivo de encontrar a solução de estabilização e de proteção que se pretende adotar.

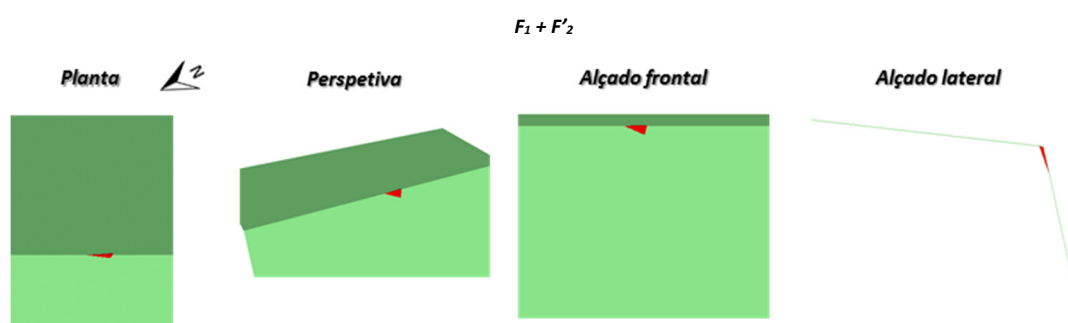
Nos Quadros 26 a 29 pode-se visualizar os dados usados e os respetivos resultados obtidos para a zona geotécnicas ZG1, ZG2, ZG3 e ZG4, respetivamente. É de salientar que não são apresentados

resultados para a zona geotécnica ZG5, porque esta apresenta um elevado grau de alteração e, por isso, a existência e a probabilidade de formação de cunhas é baixa.

Para a zona geotécnica ZG1 considerou-se o cruzamento das famílias observadas através do teste de Markland, mas no quadro 26 só é apresentada uma interseção de famílias de descontinuidades pois os resultados das restantes são bastante idênticos. O resultado obtido é o expectável, face à blocometria estudada anteriormente, pois os blocos formados serão de reduzido tamanho.

**Quadro 26** – Dados utilizados e informações obtidas através do *Swedge* para a zona ZG1.

| Zona Geotécnica 1 (ZG1)                 |                          |                           |                            |                          |
|---|--------------------------|---------------------------|----------------------------|--------------------------|
| $F_1 + F'_2; F'_1 + F'_2; F''_1 + F'_2$ |                          |                           |                            |                          |
| Talude - N 24° E; 74° NW                | $F_1$ - N 126° E; 80° NE | $F'_1$ - N 110° E; 76° NE | $F''_1$ - N 140° E; 89° NE | $F'_2$ - N 20° E; 66° NW |



Demonstração de um só exemplo, pois os restantes são bastante idênticos

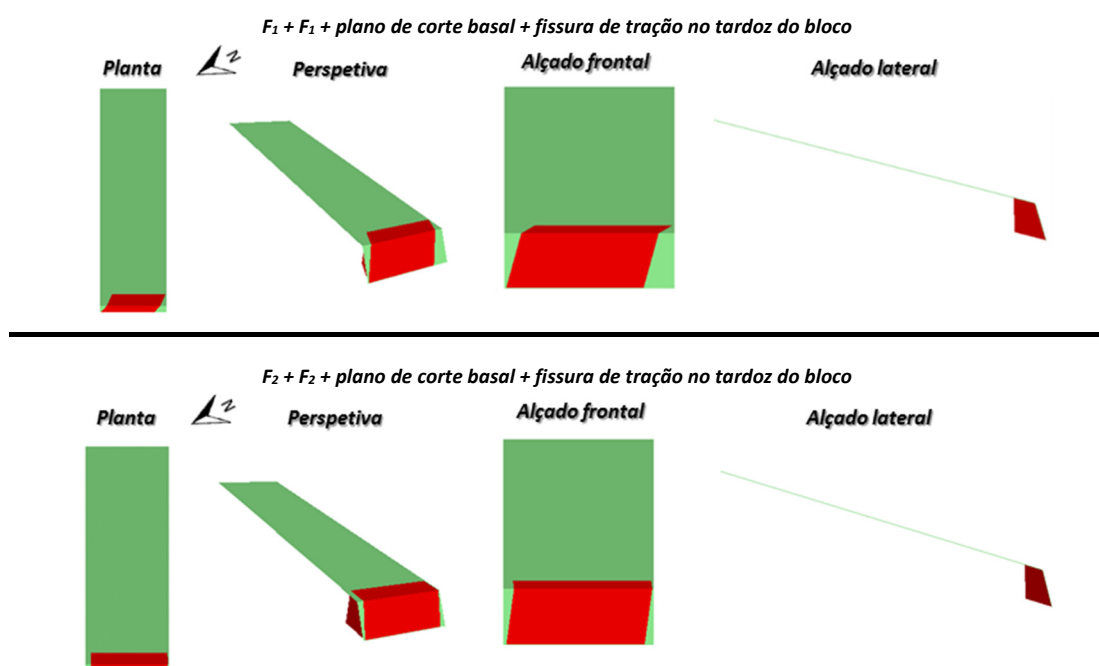
| Propriedades das cunhas | $F_1 + F'_2$ | $F'_1 + F'_2$ | $F''_1 + F'_2$ |
|-------------------------|--------------|---------------|----------------|
| Peso (tf)               | 0,447        | 0,468         | 0,445          |
| Volume (m³)             | 0,172        | 0,180         | 0,171          |
| Fator de segurança      | 0,5622       | 0,4642        | 0,6094         |

Para a zona geotécnica ZG2 não existe o cruzamento de famílias de descontinuidades que possam originar blocos rochosos, pelo que todos os blocos existentes, cuja presença é evidente pela observação da escarpa, são resultado de planos de descontinuidade da mesma família. Por isso, foram admitidas as famílias  $F_1$  e  $F_2$ , bem como um plano de corte basal e uma fissura de tração no tardo do bloco, resultando as cunhas demonstradas no Quadro 27.

Os fatores de segurança obtidos são superiores à unidade, o que permitiria concluir que, nesta zona, as cunhas estudadas se encontram estáveis. Mas, em contrapartida, como não é possível considerar no cálculo alguns fatores que podem potenciar a instabilização das cunhas, como, por exemplo, a presença de raízes, e pela observação da escarpa que se identificam alguns destes blocos com evidências de instabilização iminente, considerou-se o estudo da queda de blocos resultantes da formação destas cunhas nas modelações do programa de cálculo *Rocfall*.

**Quadro 27** - Dados utilizados e informações obtidas através do *Swedge* para zona ZG2.

| Zona Geotécnica 2 (ZG2)  |                                   |                                   |                               |
|--|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| F <sub>1</sub> + F <sub>1</sub> + plano de corte basal + fissura de tração no tardo do bloco; F <sub>2</sub> + F <sub>2</sub> + plano de corte basal + fissura de tração no tardo do bloco |                                   |                                   |                               |
| Talude - N 18° E; 74° NW   | F <sub>1</sub> - N 142° E; 86° NE | F <sub>2</sub> - N 104° E; 82° NE | Plano basal - N 12° E; 15° NW |

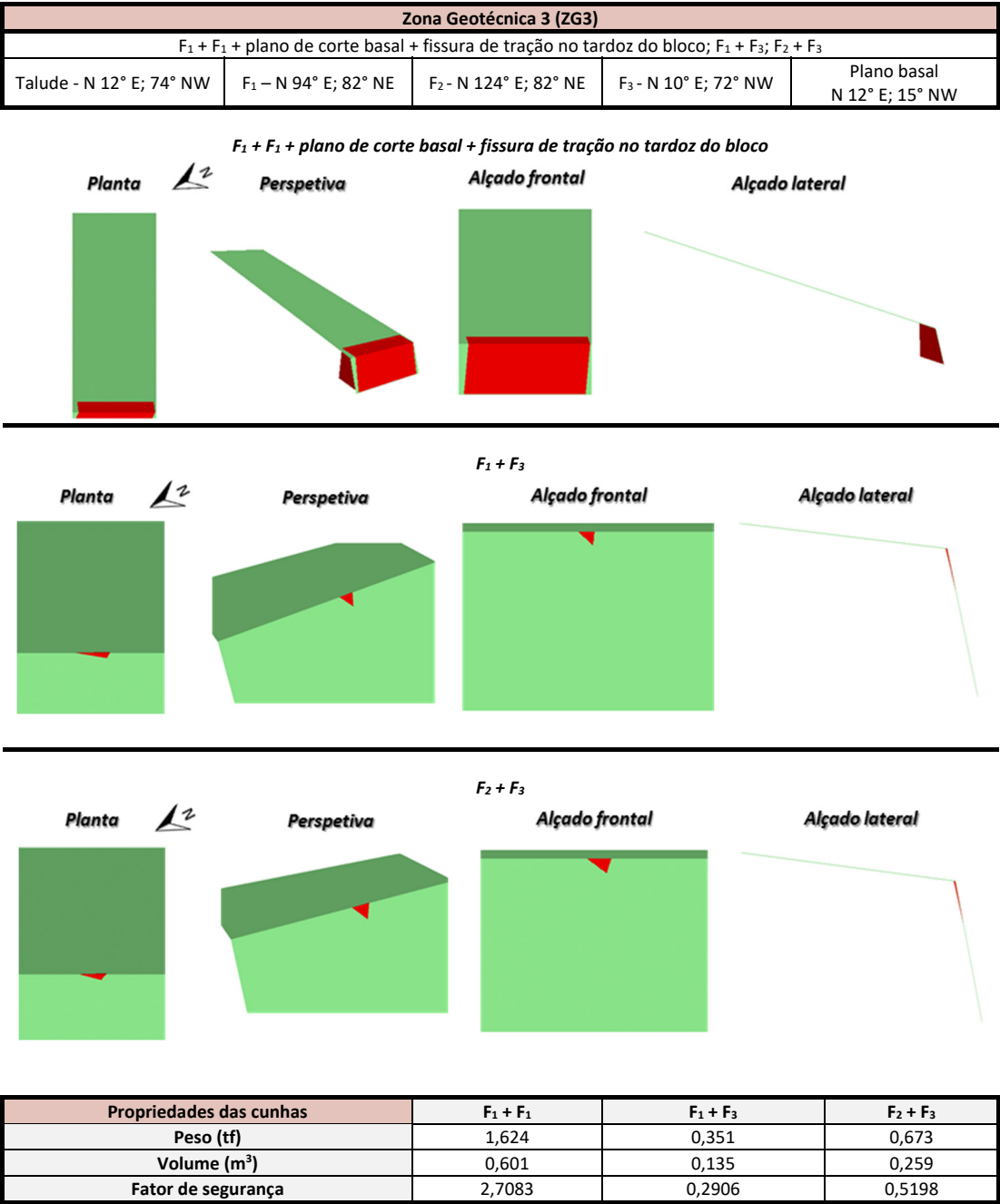


| Propriedades das cunhas  | F <sub>1</sub> + F <sub>1</sub> | F <sub>2</sub> + F <sub>2</sub> |
|--------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Peso (tf)                | 1,263                           | 1,298                           |
| Volume (m <sup>3</sup> ) | 0,468                           | 0,481                           |
| Fator de segurança       | 2,6399                          | 4,0478                          |

No caso da zona geotécnica ZG3 verifica-se a existência de três famílias de descontinuidades, F<sub>1</sub>, F<sub>2</sub> e F<sub>3</sub>, sendo que na interseção de dois planos da família F<sub>1</sub> considera-se um corte basal sub-horizontal e um plano associado a uma fissura de tração no tardo do bloco (Quadro 28).

Com a análise do quadro mencionado anteriormente, apenas o primeiro cruzamento de famílias induz a formação de blocos com fator de segurança superior à unidade, pelo que as restantes cunhas devem ser motivo de análise cuidada.

**Quadro 28** - Dados utilizados e informações obtidas através do *Swedge* para a zona ZG3.

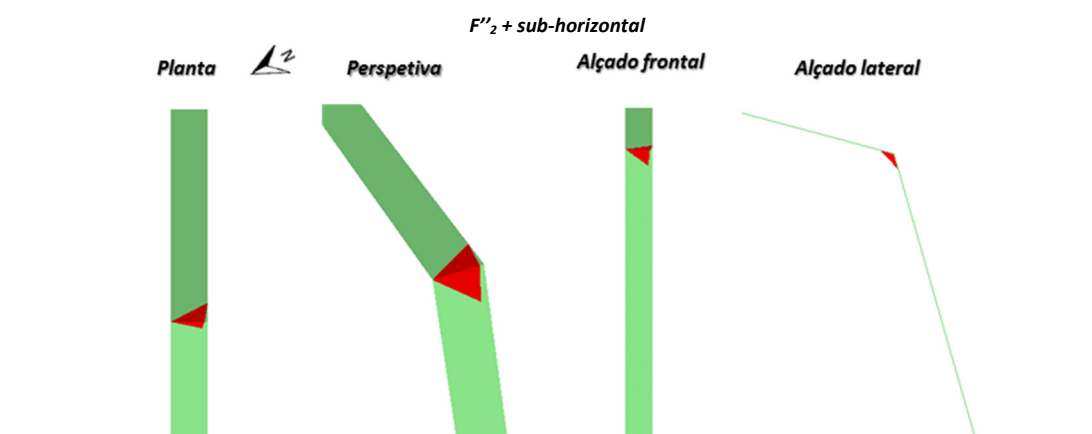
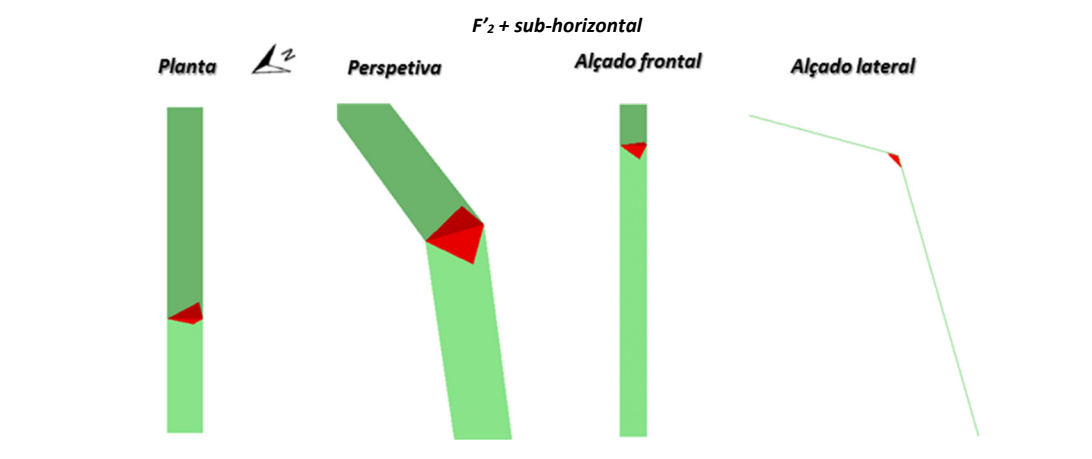
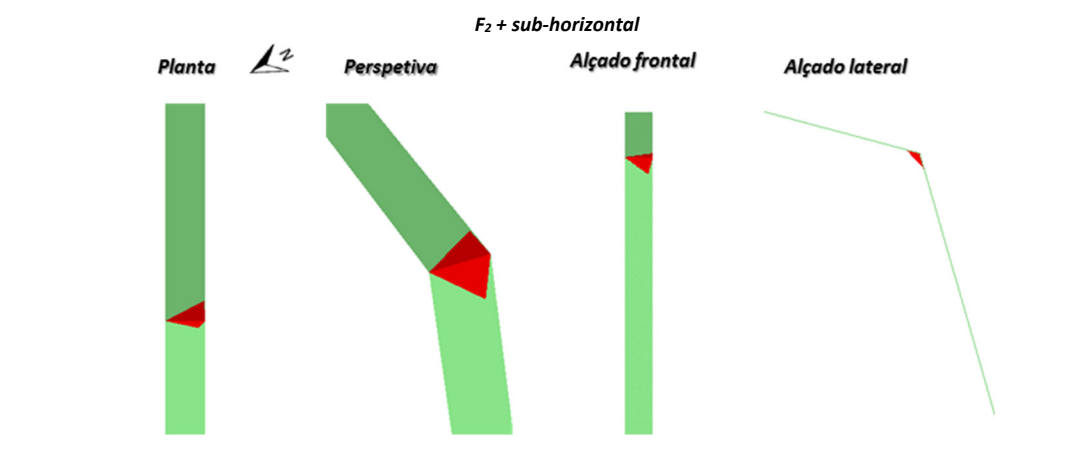


Por último, a zona geotécnica 4 é designada pelo teste de Markland como a zona mais crítica. Considerar-se-á nesta zona a presença de uma família sub-horizontal que é bastante expressiva em toda a escarpa. Nesta zona é possível visualizar cunhas com tamanhos superiores aos obtidos nas restantes, aspeto que se pode confirmar no local.

Assim no Quadro 29 estão representados as cunhas formadas, bem como as respetivas características.

**Quadro 29** - Dados utilizados e informações obtidas através do *Swedge* para a zona ZG4.

| Zona Geotécnica 4 (ZG4)  |                           |                            |                             |                                   |
|--|---------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|
| $F_2$ + sub-horizontal; $F'_2$ + subhorizontal; $F''_2$ + sub-horizontal |                           |                            |                             |                                   |
| Talude<br>N 42° E; 74° NW  | $F_2$<br>N 124° E; 72° NE | $F'_2$<br>N 110° E; 60° NE | $F''_2$<br>N 140° E; 86° NE | Sub-horizontal<br>N 20° E; 52° NW |



| Propriedades das cunhas  | $F_2$ + sub-horizontal | $F'_2$ + sub-horizontal | $F''_2$ + sub-horizontal |
|--------------------------|------------------------|-------------------------|--------------------------|
| Peso (tf)                | 3,297                  | 2,664                   | 3,186                    |
| Volume (m <sup>3</sup> ) | 1,268                  | 1,025                   | 1,226                    |
| Fator de segurança       | 0,8825                 | 0,8328                  | 1,0161                   |

### 3.8.2.2. Queda de blocos - RocFall

Com recurso ao programa de cálculo *Swedge* conseguiu-se determinar a configuração e as características das cunhas que resultam da interseção das diferentes famílias de descontinuidades, que posteriormente são consideradas no programa *Rocfall* para a avaliação da queda de blocos.

O *Rocfall* (versão 5.0) já foi abordado em detalhe no capítulo 2, mas, de forma sucinta, este permite avaliar a trajetória de um bloco rochoso, podendo-se determinar a energia cinética e a velocidade em qualquer momento da mesma. Este programa representa uma ferramenta bastante útil, pois pode-se analisar a mesma trajetória utilizando barreiras de proteção (e.g. barreiras flexíveis).

Sendo assim, na Figura 61 pode-se visualizar todos os passos necessários para alcançar o objetivo final, é necessário salientar que nesta modelação são utilizados apenas 3 materiais (Quadro 30), o asfalto, solo e a rocha.

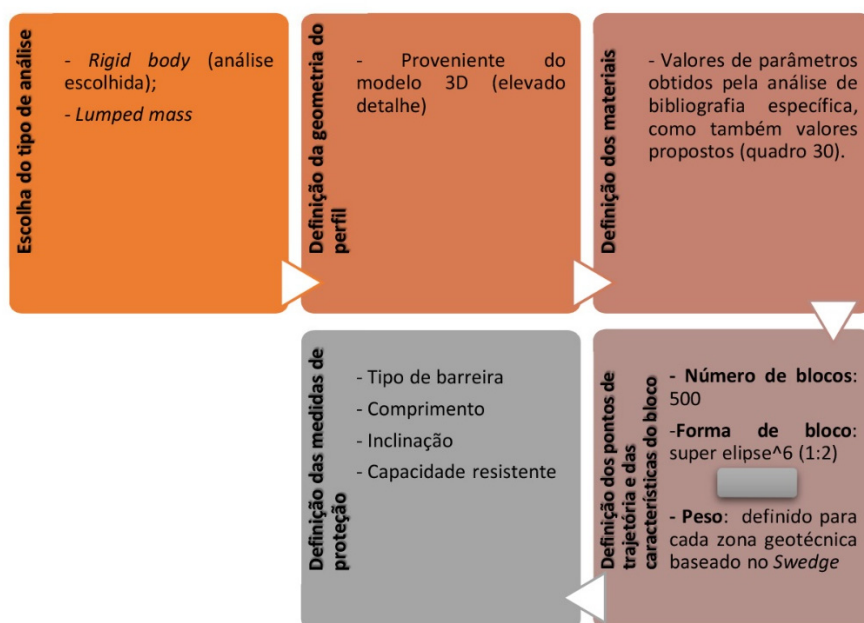


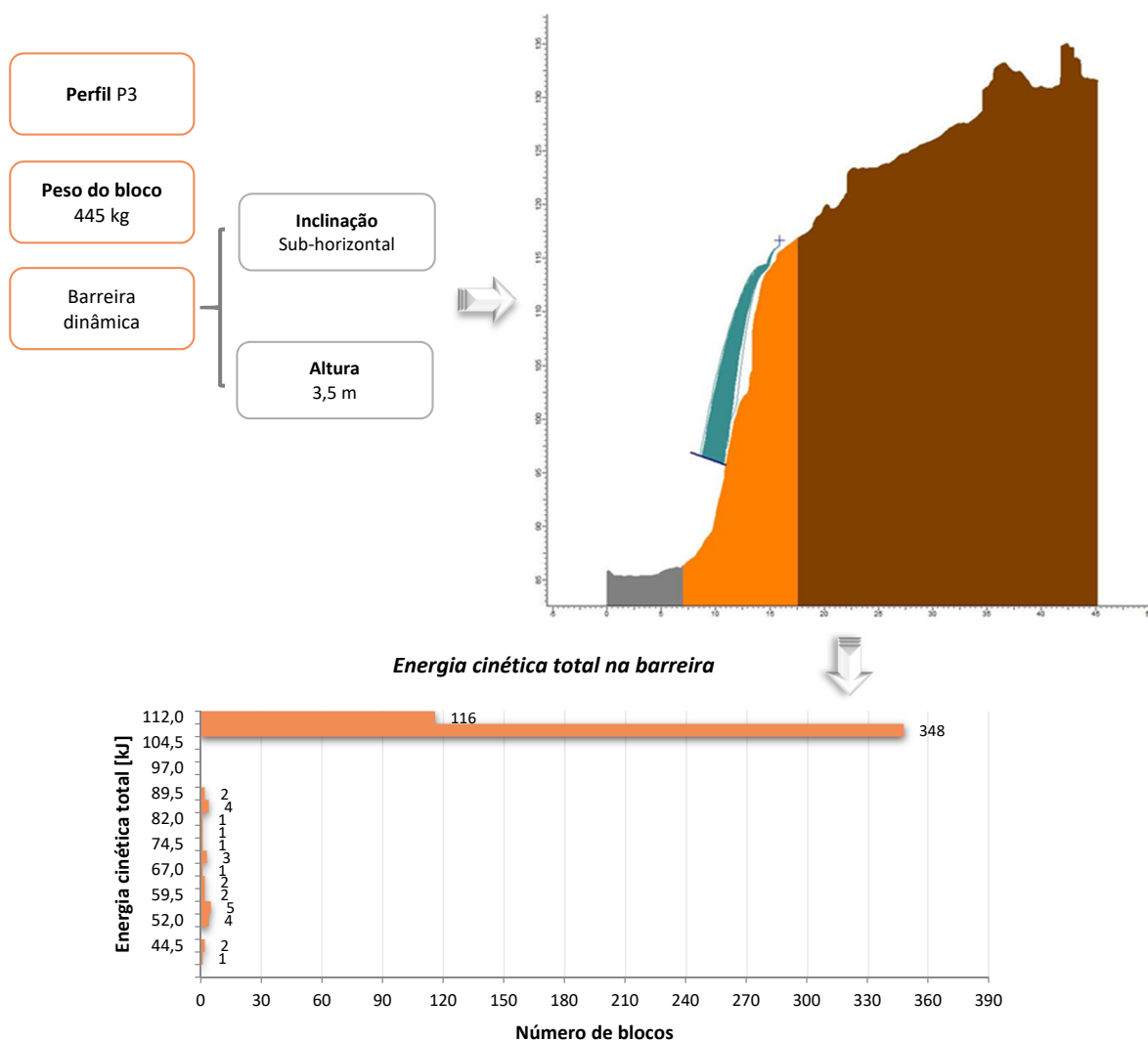
Figura 61 - Etapas de aplicação do programa *Rocfall*.

Quadro 30 – Parâmetros dos materiais aplicados no programa *Rocfall*.

| Rocha                                  |              |       |               |                 |                 |
|--|--------------|-------|---------------|-----------------|-----------------|
| Propriedades                           | Distribuição | Média | Desvio Padrão | Mínimo Relativo | Máximo Relativo |
| Coefficiente de restituição Normal     | Normal       | 0.35  | 0.033         | 0.099           | 0.099           |
| Coefficiente de restituição Tangencial |              | 0.85  | 0.0267        | 0.0801          | 0.0801          |
| Atrito Dinâmico                        |              | 0.67  | 0.0588        | 0.1764          | 0.1764          |
| Resistência ao Rolamento               |              | 0.15  | 0.02          | 0.06            | 0.06            |
| Solo                                   |              |       |               |                 |                 |
| Propriedades                           | Distribuição | Média | Desvio Padrão | Mínimo Relativo | Máximo Relativo |
| Coefficiente de restituição Normal     | Normal       | 0.35  | 0.04          | 0.12            | 0.12            |
| Coefficiente de restituição Tangencial |              | 0.8   |               |                 |                 |
| Atrito Dinâmico                        |              | 0.5   |               |                 |                 |
| Resistência ao Rolamento               |              | 0.3   |               |                 |                 |
| Asfalto                                |              |       |               |                 |                 |
| Propriedades                           | Distribuição | Média | Desvio Padrão | Mínimo Relativo | Máximo Relativo |
| Coefficiente de restituição Normal     | Normal       | 0.4   | 0.04          | 0.12            | 0.12            |
| Coefficiente de restituição Tangencial |              | 0.9   | 0.03          | 0.09            | 0.09            |
| Atrito Dinâmico                        |              | 0.5   | 0.04          | 0.12            | 0.12            |
| Resistência ao Rolamento               |              | 0.1   | 0.01          | 0.03            | 0.03            |

Após a breve explicação anterior sobre a modelação a realizar no programa *Rocfall*, o próximo passo é realizar várias análises para as diversas zonas geotécnicas. Relativamente à **zona geotécnica 1**, esta não será estudada pois não foi possível identificar aquando das visitas de campo a existência de blocos que possam estar em risco de queda, sendo assim, não é justificável aplicar esta modelação. Já na **zona geotécnica 4** a modelação com *Rocfall*, não foi aplicada pois esta é uma zona onde o maciço se encontra bastante fraturado e a dimensão, a geometria e a posição dos blocos induz a uma solução de proteção composta por barreiras estáticas como pregagens, cabos de aço e rede metálica. Como no programa de cálculo automático anterior, a **zona geotécnica 5** não será analisada porque encontra-se bastante decomposta e não existem condições para a formação de cunhas e, consequentemente, a queda de blocos.

Sendo assim, na Figura 62 é possível visualizar a trajetória dos 500 blocos testados para a zona geotécnica 2 com uma barreira dinâmica a servir de proteção, bem como a energia cinética com que os blocos atingem a mesma.

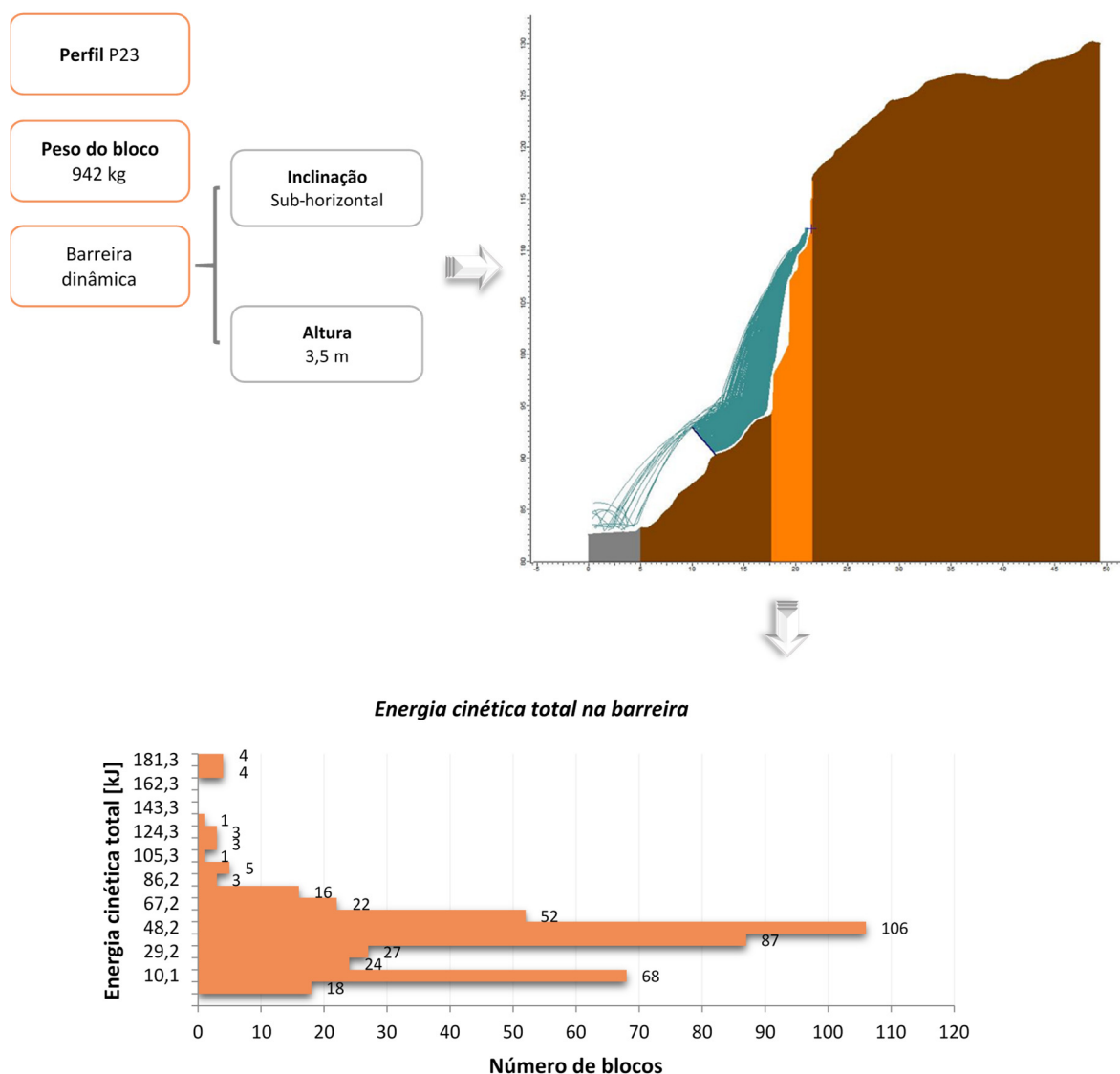


**Figura 62** - Modelação da queda de blocos para a zona geotécnica 2.



Com a observação da figura pode-se afirmar que dos 500 blocos nenhum ultrapassa a barreira e que o máximo da energia cinética que um bloco transporta é de 112 kJ.

Para analisar a queda de blocos da zona geotécnica 3 utilizou-se o P23, onde se utilizou as características apresentadas na Figura 63.



**Figura 63** - Modelação da queda de blocos para a zona geotécnica 3.

Nesta zona geotécnica os blocos que não ficaram retidos na barreira flexível foram 11 e a energia cinética máxima com que a atingiram foi de 181,3 kJ.

É de salientar que cerca de 2% do total de blocos tem baixa probabilidade de queda, mas mais baixa é a de esses blocos atingirem veículos, pessoas, entre outros.

---

### 3.8.3. Análise de suscetibilidade e nível de perigosidade de taludes rochosos

Existe uma grande diversidade de métodos e técnicas para a avaliação da estabilidade de taludes na fase de projeto. Contudo, os métodos e técnicas para esta avaliação durante a fase de exploração, isto é, que utilizam principalmente informações sobre o que foi realmente construído e o seu estado real relatado a partir de inspeções visuais, sistemas de monitorização e informações indiretas (tais como o clima e o zonamento sísmico), são escassos (e.g., Pinheiro et al., 2015; Vaz & Zêzere, 2016). Apesar de já terem sido propostos diversos sistemas de classificação de qualidade geotécnica e estrutural, estes apresentam, normalmente, um número limitado de fatores envolvidos na estabilidade dos taludes rochosos e estão, em geral, limitados à análise de alguns processos de rotura, tais como o *Rockfall Hazard Rating System (RHRS)* proposto por Pierson et al. (1990), o qual foi posteriormente modificado e atualizado por Budetta (2004), o *RHRSm*, e mais recentemente adaptado por Pinheiro et al., (2014, 2015), o *RHRSm2*. Este sistema destina-se à obtenção de um índice de qualidade aplicado a taludes predominantemente rochosos em meios rodoviários.

Neste sentido, o *Índice de Qualidade de Taludes (SQI – Slope Quality Index)*, desenvolvido por Pinheiro et al. (2015), é um sistema que integra a avaliação de uma vasta gama de fatores internos e externos relacionados com a qualidade e estabilidade dos taludes. Este sistema baseia-se no sistema de classificação de maciços rochosos desenvolvido por Liu et al. (2007).

De modo a avaliar a suscetibilidade e o nível de perigosidade do talude rochoso de S. Cristóvão foram aplicados, com diversas adaptações, o *Rockfall Hazard Rating System*, versão *RHRSm2*, e o *Índice de Qualidade de Taludes (SQI)*, ambos propostos por Pinheiro et al. (2015). Salienta-se o facto de o índice *SQI* incorporar no seio dos fatores geológico-geomecânicos o valor obtido para o sistema *RHRSm2* e ainda, por exemplo, o *SMR (Slope Mass Rating)* ou o *RMR (Rock Mass Rating)*.

No Quadro 31 apresenta-se a síntese dos resultados dos dois métodos aplicados às zonas geomecânicas ZGM1, ZGM2 e ZGM3 definidas, anteriormente, para o talude de S. Cristóvão<sup>6</sup>.

---

<sup>6</sup> No anexo III encontram-se os índices *SQI* e *RHRSm2* em ficheiro Excel.

**Quadro 31** - Síntese das características das zonas geomecânicas ZGM1, ZGM2 e ZGM3 do talude de S. Cristóvão, de acordo com os sistemas *RHRSm2* e *SQI*.

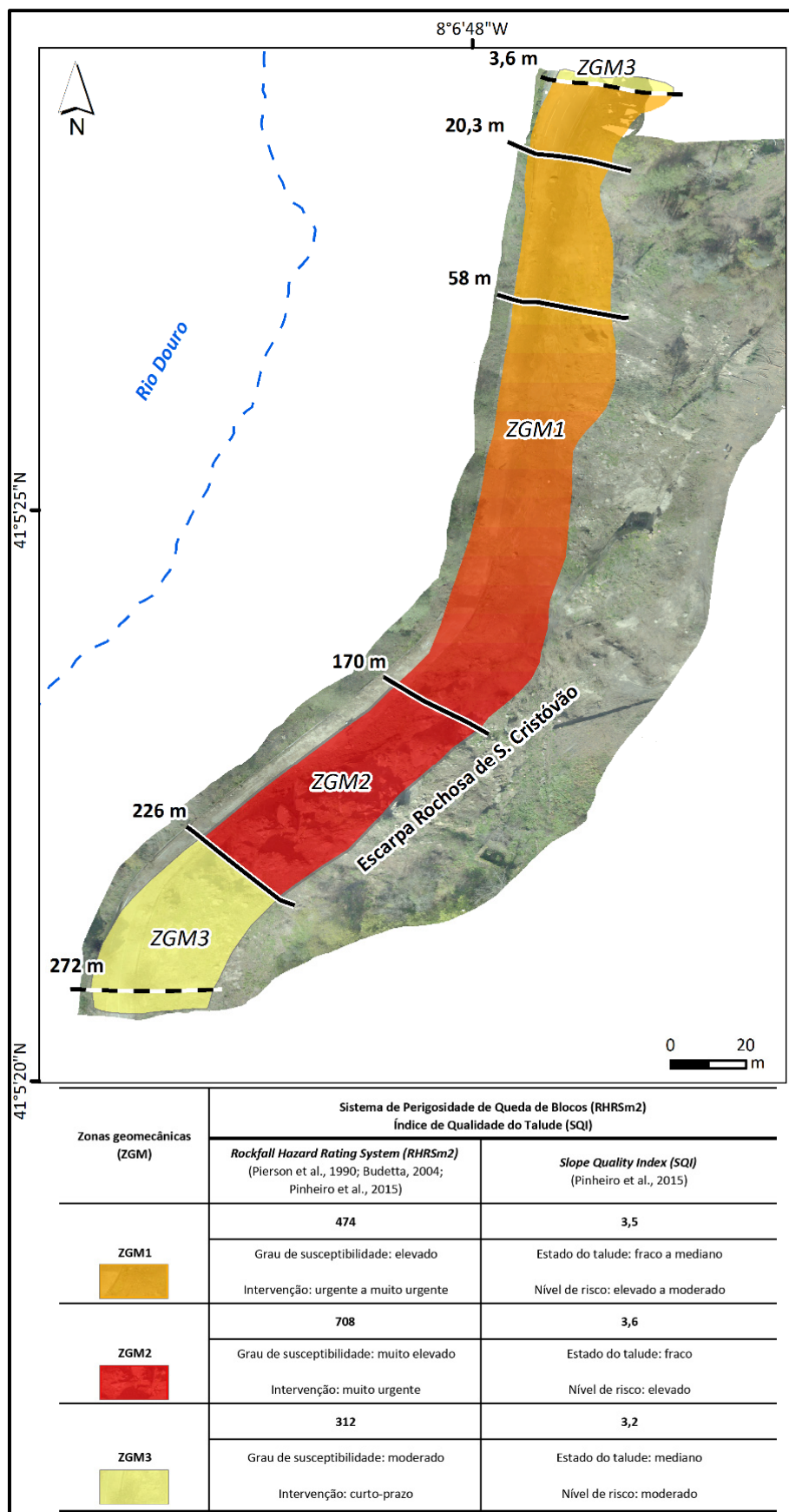
| Zonas geomecânicas (ZGM) | Sistema de Perigosidade de Queda de Blocos ( <i>RHRSm2</i> )<br>Índice de Qualidade do Talude ( <i>SQI</i> )  |   |
|--------------------------|---|---|
|                          | <i>Rockfall Hazard Rating System (RHRSm2)</i><br>(Pierson et al., 1990; Budetta, 2004; Pinheiro et al., 2015) | <i>Slope Quality Index (SQI)</i><br>(Pinheiro et al., 2015) |
| ZGM1                     | <b>474</b>  | <b>3.5</b>  |
|                          | Grau de suscetibilidade: elevado  | Estado do talude: fraco a mediano                           |
|                          | <b>Intervenção:</b> urgente a muito urgente   | <b>Nível de risco:</b> elevado a moderado                   |
| ZGM2                     | <b>708</b>  | <b>3.6</b>  |
|                          | Grau de suscetibilidade: muito elevado  | Estado do talude: fraco                                     |
|                          | <b>Intervenção:</b> muito urgente   | <b>Nível de risco:</b> elevado                              |
| ZGM3                     | <b>312</b>  | <b>3.2</b>  |
|                          | Grau de suscetibilidade: moderado   | Estado do talude: mediano                                   |
|                          | <b>Intervenção:</b> curto-prazo   | <b>Nível de risco:</b> moderado                             |

De acordo com a análise dos dados obtidos através do sistema *RHRSm2*, a zona geomecânica ZGM1 apresenta um grau de suscetibilidade elevado, preconizando uma intervenção urgente; por sua vez, a zona geomecânica ZGM2 exibe um grau de suscetibilidade muito elevado, sendo aconselhada uma intervenção muito urgente; por fim, a zona geomecânica ZGM3 patenteia um grau de suscetibilidade moderado, sendo recomendada uma intervenção a curto prazo.

No que diz respeito ao índice *SQI*, a zona geomecânica ZGM1 exibe um nível de perigosidade elevado a moderado, a zona geomecânica ZGM2 apresenta um nível de perigosidade elevado, enquanto que a zona geomecânica ZGM3 apresenta um nível de perigosidade moderado.

Desta forma, é possível verificar que, em ambas as análises, a zona geomecânica mais crítica é a ZGM2.

A Figura 64 ilustra a cartografia dos resultados obtidos para os dois métodos (*RHRSm2* e *SQI*) no talude S. Cristóvão.



**Figura 64** - Cartografia da suscetibilidade e grau de perigosidade para o talude de S. Cristóvão.

---

### 3.8.4. Proposta de solução final

#### 3.8.4.1. Elementos instabilizadores

Antes de apresentar as soluções de estabilização e proteção, é importante enumerar diversos elementos instabilizadores, identificados nas várias visitas à escarpa, que devem ser ou foram alvo de ação imediata (NEC & LABCARGA, 2016):

- A presença de vegetação arbustiva e arbórea, predominantemente constituída por pinheiro manso (*Pinus pinea*) e carvalho-alvarinho (*Quercus robur*) tendo uma maior persistência no topo da escarpa e mesmo em alguns locais com inclinação relativamente elevada. Este fator constitui um fator de instabilidade juntamente com a pressão induzida pelas raízes que se desenvolvem ao longo das descontinuidades do maciço rochoso. Para além disso, a sua existência aumenta consideravelmente o risco de incêndio. Neste momento esta vegetação já foi removida, mas é necessário haver uma manutenção frequente, de modo a que esta não se volte a desenvolver-se na escarpa (Figura 65);



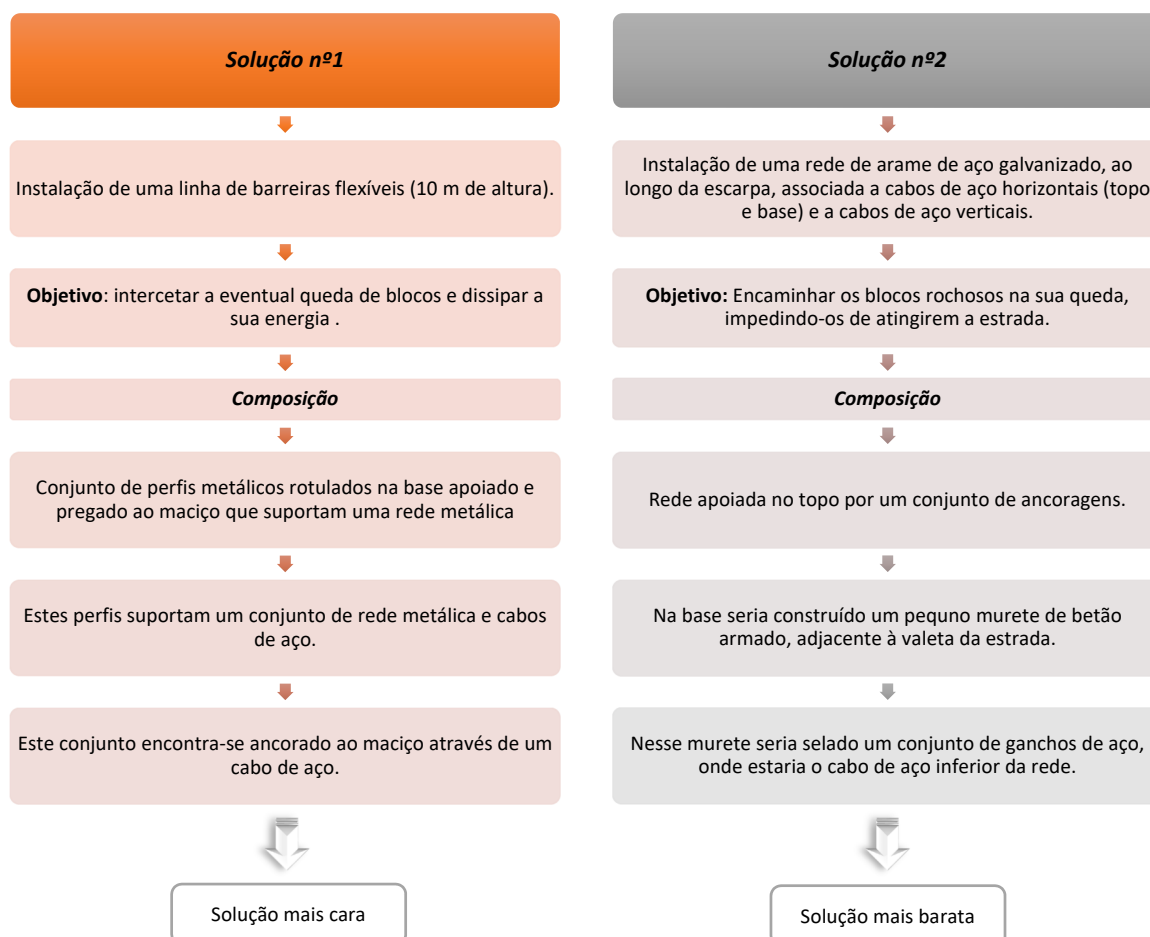
**Figura 65** – Instabilização provocada pelas raízes.

- Na generalidade do talude existe uma forte presença de água, que deve ser devidamente encaminhada, de modo a controlar e minimizar, sempre que possível, o seu aparecimento nas imediações do talude, uma vez que esta provoca incrementos de pressão nas descontinuidades do maciço rochoso, potenciando a ocorrência de fenómenos de instabilidade. É de salientar que com o processo de desmatção referido anteriormente, os trajetos naturais das linhas de água foram alterados, isto porque a integridade de alguns muros existentes foi afetada. Assim, de modo a garantir a estabilidade do talude em estudo é necessário reconstruir esses muros.

Todos os aspetos referidos anteriormente devem ser solucionados, de modo definitivo, antes da implementação das medidas de estabilização e de proteção. Alguns blocos devem ser identificados e saneados, onde é necessário ter uma especial atenção, pois a forma como estes são retirados pode afetar a estabilização de outros blocos.

#### 3.8.4.2. Soluções de proteção e estabilização

Após um detalhado estudo, obteve-se um conjunto de soluções que podem responder, da melhor forma, às particularidades verificadas nas diferentes zonas constituintes da escarpa de S. Cristóvão. Foram ponderadas algumas soluções, mas o custo associado a cada uma condicionará a escolha final. Assim, o fator custo é bastante importante no processo da escolha da solução de proteção e estabilização final, pelo que deve ser analisado de forma cuidada. Na Figura 66 pode-se visualizar as duas soluções encontradas para o problema da escarpa.



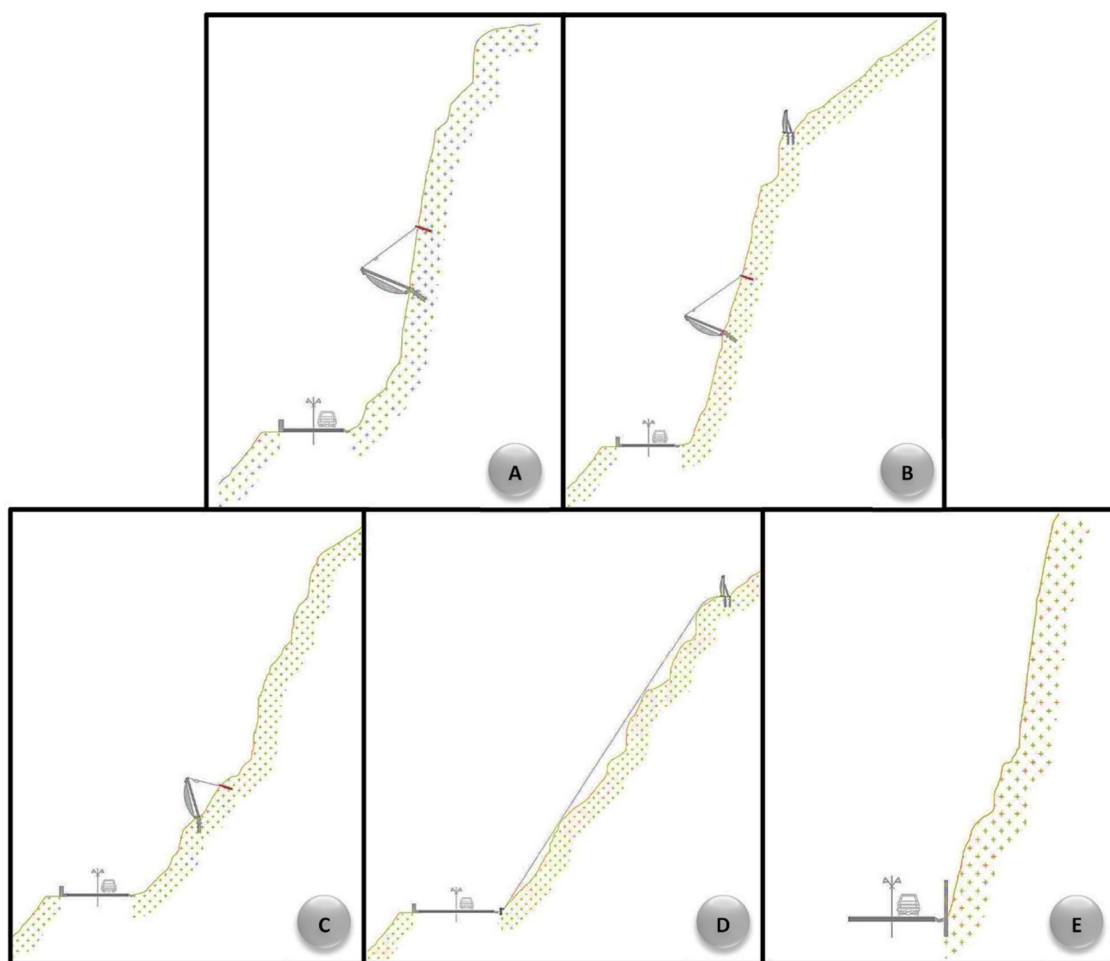
**Figura 66** - Soluções de proteção e estabilização para a escarpa de S. Cristóvão (adaptado de NEC & LABCARGA, 2016).

---

Das soluções apresentadas anteriormente, verificou-se que a articulação das duas seria o melhor para a obter a solução final, realizando alguns ajustes que sejam necessários. Sendo assim a solução adequada para a escarpa de S. Cristóvão, apresenta um custo intermédio e será a seguinte (NEC & LABCARGA, 2016):

- Implementação de uma barreira dinâmica (rotulada na base), a uma altura de 10 m aproximadamente, responsável pela interseção da queda de qualquer bloco rochoso proveniente de cotas superiores (Figura 67A);
- Entre o P2 e o P24, será colocada uma barreira dinâmica, como explicada anteriormente, acrescentando uma barreira rígida localizada no topo da escarpa, estendendo-se ao longo dos perfis P11 e P23. Esta é responsável por reter os blocos rochosos que possam rolar de cotas superiores (Figura 67B);
- Entre o P24 e P31, será adotada uma barreira dinâmica de inclinação variável (rotulada na base) na plataforma existente entre a base da escarpa e a plataforma da escarpa, intersetando todos os blocos provenientes de cotas superiores (Figura 67C);
- Entre o perfil P32 e P47, será implementado uma barreira rígida associada a uma rede de arame de aço galvanizado, ao longo da escarpa, associada a cabos de aço horizontais (topo e base) e a cabos de aço verticais. A rede irá permitir que os blocos rochosos durante a sua queda não atinjam a estrada (Figura 67D);
- A probabilidade de queda de blocos é bastante baixa na zona extrema da escarpa, mas achou-se, por bem, proceder à instalação de uma solução de proteção de barreiras rígidas constituídas por perfis metálicos e por malha electrossoldada (entre perfis) (Figura 67E).





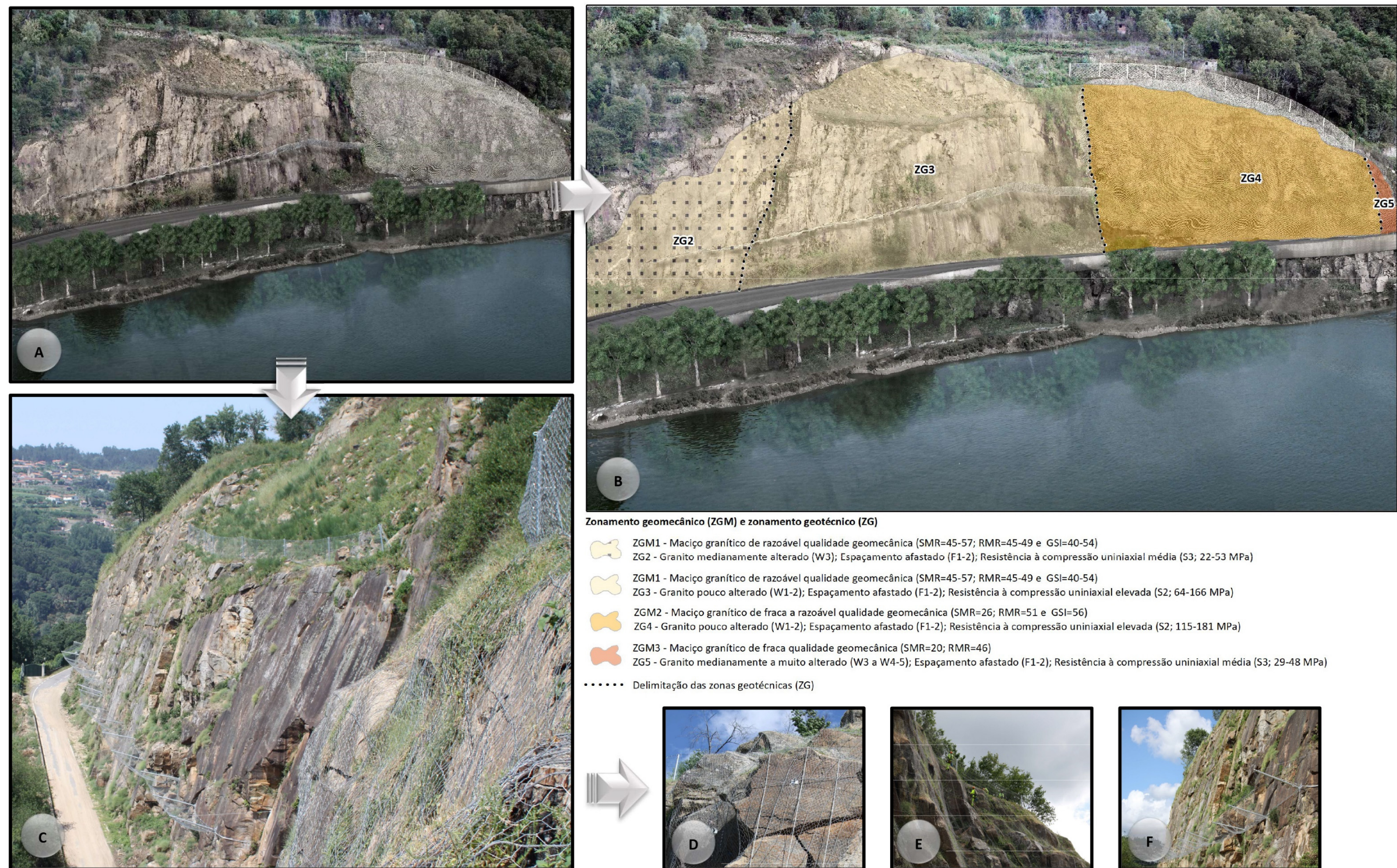
**Figura 67** – Solução de proteção com: A) Barreiras dinâmicas sub-horizontais; B) Barreiras dinâmicas sub-horizontais e barreiras rígidas no topo; C) Barreiras dinâmicas inclinadas; D) Rede de arame de aço galvanizado; E) Barreira rígida constituída por perfis HEB e malha electrossoldada (adaptado de NEC & LABCARGA, 2016)

Na Figura 68A é possível visualizar uma previsão das soluções de proteção e estabilização para a escarpa de S. Cristóvão, realizadas através do programa *3DS MAX* da *Autodesk* (Ferraz, 2016), já na Figura 68B conjugou-se os zonamentos geotécnico e geomecânico na figura referida anteriormente, por último na Figura 68C, D e E é possível identificar a solução já colocada na escarpa.

---

(Página propositadamente em branco)





**Figura 68** – A) Panorâmica tridimensional, através de modelação computacional, da escarpa com as soluções de reforço e de proteção (Ferraz, 2016); B) Sobreposição do zonamento geotécnico e geomecânico com a modelação virtual; C) Vista de perfil da escarpa de S. Cristóvão com as soluções de reforço e de proteção (Março-Maio de 2017); D) Rede metálica na zona geotécnica 4; E) Colocação das barreiras dinâmicas no topo da escarpa; F) Barreira flexível na zona geotécnica 3.



---

(Página propositadamente em branco)

---

#### ***4. CONCLUSÕES***

---

(Página propositadamente em branco)

---

#### 4.1. Considerações finais

Realizar este trabalho teve como grande objetivo caracterizar, inspecionar e avaliar as condições de segurança existentes na escarpa rochosa de S. Cristóvão (Cinfães), bem como, apresentar uma proposta de solução de estabilização e proteção.

Ainda é possível verificar todo o seu desenvolvimento e metodologia na intervenção no terreno, na inspeção, nas cartografias de zonamentos geotécnico e geomecânico, na modelação geotécnica e assim obter a solução final de proteção.

Como já foi referido anteriormente, este estudo foi realizado na freguesia de S. Cristóvão de Nogueira, concelho de Cinfães, onde ocorreu a queda de um bloco rochoso, no passado ano 2015 no mês de julho, que provocou o fecho da via rodoviária.

Numa primeira fase, o estudo começou com uma recolha de informações existentes acerca da escarpa, recolha de elementos bibliográficos, dados sobre o acidente ocorrido, de forma a preparar as intervenções a realizar na fase de campo.

As primeiras visitas à escarpa tiveram como objetivo o reconhecimento cartográfico e a verificação dos afloramentos rochosos. Resumidamente, esta visita serviu para conhecer profundamente a escarpa rochosa em que se irá trabalhar.

Após a conclusão da primeira fase é possível realizar uma intervenção posterior ao local e aplicar a técnica de amostragem linear (“*scanlines*”) para classificar o maciço rochoso e a respetiva cartografia de zonamento geotécnico. Para além disto, realizou-se um ensaio de campo para avaliar a resistência do material-rocha em afloramento, com recurso ao esclerómetro portátil (*Martelo de Schmidt* – tipo L).

Na etapa de gabinete reuniu-se devidamente todos os dados, para posterior análise estatística e aplicação das diferentes classificações geomecânicas mais genéricas (RMR, GSI) e posteriormente as classificações específicas (SMR, RHRSm2, SQI) do estudo de escarpas rochosas.

Analisando as características locais, é possível retirar as seguintes conclusões:

- A geologia local é constituída por um granito predominantemente biotítico, de grão médio, o qual se apresenta, em regra, pouco a medianamente alterado ( $W_{1-2}$  a  $W_3$ ). Em grande o maciço rochoso encontra-se compartimentado e muito fraturado, bem como a existência de megaestruturas sub-horizontais (com milonitização associada) conferem ao maciço granítico uma compartimentação prismática, romboédrica e, por vezes, equidimensional;



---

→ O zonamento geotécnico definido na área em estudo pode ser dividido em diversas unidades:

- i. **ZG1** – caracterizada por um granito medianamente alterado ( $W_3$ ) a pouco alterado ( $W_{1-2}$ ), com espaçamentos afastados ( $F_{1-2}$ ) e resistência à compressão uniaxial média ( $S_3$ ) estimada entre 21 e 50 MPa;
- ii. **ZG2** – caracterizada por um granito medianamente alterado ( $W_3$ ), com espaçamentos afastados ( $F_{1-2}$ ) e resistência à compressão uniaxial média ( $S_3$ ) estimada entre 22 e 53 MPa;
- iii. **ZG3** – caracterizada por um granito pouco alterado ( $W_{1-2}$ ), com espaçamentos afastados ( $F_{1-2}$ ) e resistência à compressão uniaxial elevada ( $S_2$ ) estimada entre 64 e 166 MPa;
- iv. **ZG4** – caracterizada por um granito pouco alterado ( $W_{1-2}$ ), com espaçamentos afastados ( $F_{1-2}$ ) e resistência à compressão uniaxial ( $S_2$ ) estimada entre 115 – 181 MPa;
- v. **ZG5** – caracterizada por um granito medianamente alterado ( $W_3$ ) a muito alterado ( $W_{4-5}$ ), com espaçamentos afastados ( $F_{1-2}$ ) e resistência à compressão uniaxial média ( $S_3$ ) estimada entre 29 e 48 MPa.

→ O estudo geomecânico permitiu elaborar uma cartografia geomecânica composta essencialmente por três zonas, ZGM1, ZGM2 e ZGM3, a saber:

- i. **ZGM1** – razoável qualidade geomecânica, com  $SMR=45-57$ ,  $RMR|89=35-49$  e  $GSI|2013=40-54$ ;
- ii. **ZGM2** – razoável a fraca qualidade geomecânica, com  $SMR=26$ ,  $RMR|89=51$  e  $GSI|2013=56$ ;
- iii. **ZGM3** – fraca qualidade geomecânica, com  $SMR=20$  e  $RMR|89=46$ .

→ De acordo com as classes de estabilidade definidas para a classificação SMR, as zonas geotécnicas ZG1, ZG2, ZG3 e ZG5 são consideradas como parcialmente estáveis, enquanto que a zona geotécnica ZG4 é considerada instável. Relativamente aos tipos de rotura prováveis, função do valor de SMR, nas zonas geotécnicas ZG1, ZG2, ZG3 e ZG5, poderão ocorrer alguns fenómenos de instabilidade; por seu turno, na zona geotécnica ZG4 poderão ocorrer muitos fenómenos de instabilidade, nomeadamente, roturas planares importantes, muitas roturas em cunha e mesmo diversos tombamentos. A análise geoestrutural da

---

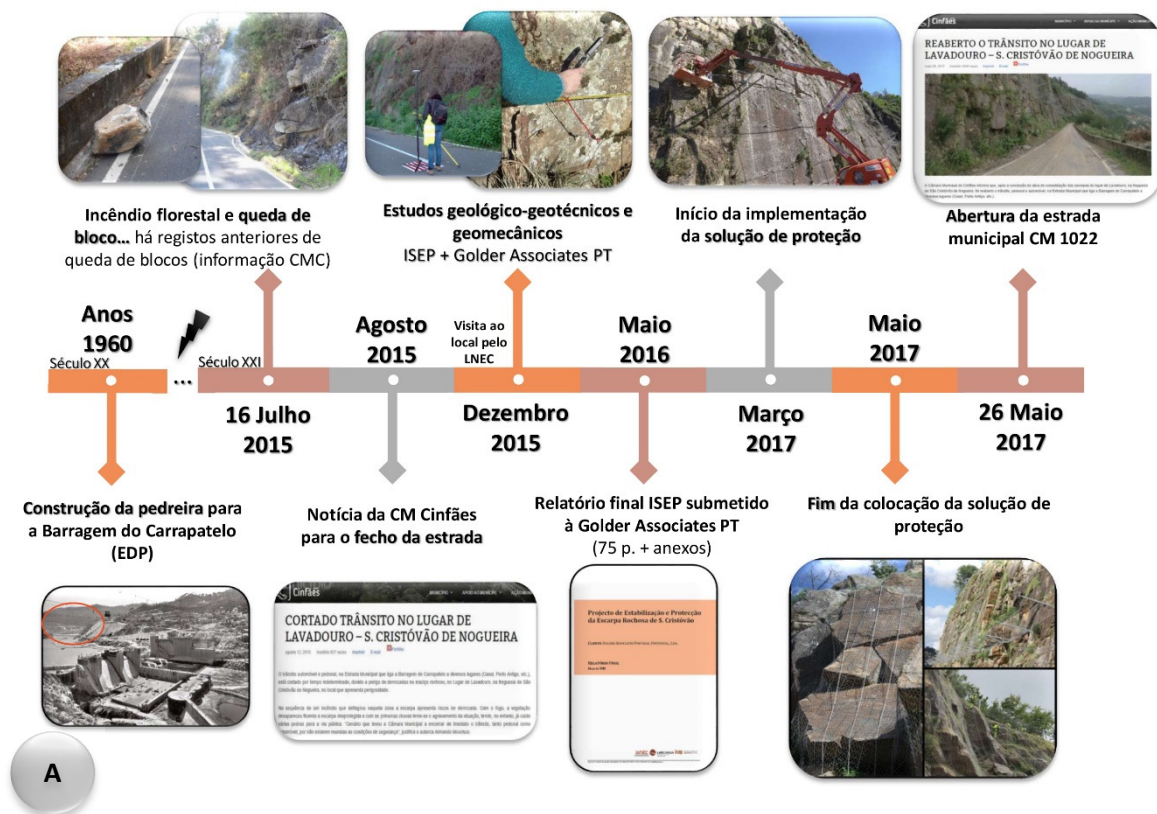
estabilidade pelo “Teste de Markland” permitiu retirar as seguintes conclusões para cada zona geotécnica:

- i. Na zona **ZG1** poderão ocorrer roturas planares associadas à segunda família de descontinuidades ( $F_2$ ) e a interseção das duas famílias ( $F_1$  e  $F_2$ ) poderá originar roturas em cunha com sentidos de escorregamento para o quadrante NW;
  - ii. Na zona **ZG2** não é previsível a ocorrência de qualquer tipo de rotura;
  - iii. Na zona **ZG3** a terceira família de descontinuidades ( $F_3$ ) pode dar origem a roturas planares; além disso, as interseções das famílias  $F_2$  e  $F_3$  e das famílias  $F_1$  e  $F_3$  poderão originar roturas em cunha com sentidos de escorregamento para os quadrantes NW e SW;
  - iv. Na zona **ZG4** poderão ocorrer tombamentos associados à família principal de descontinuidades ( $F_1$ ), roturas planares associadas à terceira família de descontinuidades ( $F_3$ ) e as interseções das famílias  $F_2$  e  $F_3$  e das famílias  $F_1$  e  $F_3$  poderão originar roturas em cunha com sentidos de escorregamento para os quadrantes NNW e WSW;
  - v. Na zona **ZG5** não é previsível a ocorrência de qualquer tipo de rotura.
- Com recurso ao *Rocfall*, modelou-se a queda de blocos rochosos ao longo de diferentes perfis transversais, permitindo aferir a localização e as características das barreiras rígidas e dinâmicas a instalar na escarpa para proteção da estrada municipal;
- A avaliação da suscetibilidade e do nível de perigosidade do talude de S. Cristóvão, realizada através do RHRSm2 (*Rockfall Hazard Rating System*) e SQI (*Slope Quality Index*), permitiu concluir que a zona geomecânica ZGM2 e a parte contígua da ZGM1 é a mais crítica, requerendo uma intervenção muito urgente;
- Relativamente à solução de reforço e proteção da escarpa envolveu a definição de um conjunto de soluções que se adaptaram às características identificadas nas diferentes zonas. Sendo assim nas zonas geotécnicas ZG1, ZG2 e ZG3 adotou-se pelas barreiras dinâmicas e rígidas para a recolha de blocos rochosos em queda. Na zona geotécnica ZG4, o mais adequado é a instalação de rede de aço galvanizado, associada a uma barreira rígida no topo, de modo a reter os blocos provenientes da zona superior da escarpa e a conduzir para o respetivo pé os blocos do primeiro plano da escarpa que se instabilizem.
- Antes da realização das intervenções deve-se realizar um cuidadoso saneamento de blocos rochosos instáveis e o recalçamento de outros.

---

→ A drenagem superficial na zona aplanada existente no topo da escarpa deverá ser reorganizada, procurando encaminhar as águas para as duas linhas de água identificadas a montante e a jusante da escarpa em estudo.

Em jeito de remate final a Figura 69A apresenta o fio do tempo das intervenções na designada escarpa de S. Cristóvão, ou seja, desde a exploração do maciço rochoso aquando da construção da barragem do Carrapatelo (anos 1960, Século XX) passando pelo incidente da queda de bloco em 16 de julho de 2015 até ao dia em que ocorreu a reabertura da estrada municipal (26 de maio de 2017). Em contrapartida na Figura 69B ilustra-se um fio do tempo em que se esboça as notícias públicas difundidas à população pela Câmara Municipal de Cinfães e os relatórios técnicos promovidos por instituições e empresas envolvidas nos estudos de projeto, de solução e colocação da proteção do maciço rochoso. De facto, este relatório de projeto beneficiou imenso de a signatária ter tido o privilégio de calcorrear a escarpa de S. Cristóvão, praticamente, após o incidente pós-julho de 2015 até às intensas investigações geotécnicas *in situ* e estudo geomecânico que possibilitaram uma melhor modelação geotécnica e acompanhamento, em parte, da solução de proteção do maciço de S. Cristóvão, lugar do Lavadouro (Cinfães).



**Figura 69 - A) Fio do tempo do incidente na escarpa de S. Cristóvão (2015/2016); B) Interações entre a CMC e as diversas empresas e instituições envolvidas.**

---

## 4.2. Perspetivas futuras

Efetuada uma análise crítica em relação a todo um processo de investigação com recurso a um caso de estudo real, é possível apresentar algumas recomendações e perspetivas futuras que melhorariam o estudo geotécnico da escarpa:

- Realização do Tilt-test com base num conjunto de amostras obtidas no local de estudo, para permitir estimar o ângulo de atrito ( $\Phi$ ) e caso seja uma descontinuidade lisa e sem sinais de alteração, o ângulo de atrito de base ( $\Phi_b$ ). Através de uma correlação com os resultados obtidos do ensaio do *Martelo de Schmidt* é possível avaliar o ângulo de atrito de base ( $\Phi_b$ ) e o coeficiente de rugosidade (JRC) (Barton, 1980);
- Realização do *Point Load Test (PLT)* com recurso a amostras obtidas na escarpa de S. Cristóvão para determinar a resistência à compressão uniaxial através da correlação com o Índice PLT ( $Is_{50}$ ) (ISRM, 1985);
- Ensaio de um número considerável de blocos à escala real que permitisse a determinação mais rigorosa de parâmetros como, o coeficiente de restituição normal e tangencial e a resistência ao rolamento;
- Utilização da versão beta 6.0 do programa de cálculo automático *Rocfall* para melhorar as modelações, destacando a possibilidade de desenhar graficamente ou importar um ficheiro DXF com a forma do bloco a ensaiar, melhoramentos na análise do estabelecimento de medidas de proteção, nomeadamente ao nível das barreiras e por fim a possibilidade de considerar a existência de vegetação com diferentes densidades ao longo da trajetória.

---

## ***5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS***

---

(Página propositadamente em branco)



---

## 5. Referências bibliográficas

- Austin, R., 2010. Unmanned Aircraft Systems: Uavs design, development and deployment. John Wiley & Sons Ltd, 280 p.
- Aires-Barros, L., 1991. Alteração e alterabilidade de rochas. Instituto Nacional de Investigação Científica, INIC, Lisboa, 384 pp.
- Alejano, L.R., Gonzalez, J. & Muralha, J., 2012. Comparison of different tilt testing techniques and basic friction angle variability assessment. *Rock Mechanics & Rock Engineering*, 45(6):1023-1035.
- Aydin, A., 2015. ISRM Suggested method for determination of the Schmidt hammer rebound hardness: revised version. In: Ulusay R. (ed.), *The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007–2014*. Springer, Cham, Heidelberg, p. 25-33.
- Barton, N. & Bandis, S., 1980. Review of predictive capabilities of JRC – JCS model in engineering practice. *Rock joints*, Barton & Stephansson, Rotterdam.
- Bieniawski, Z.T., 1976. Rock mass classification in rock engineering. In: Bieniawski Z.T., ed., *Proceedings of the symposium Exploration for rock engineering*, Cape Town, Balkema, 1: 97-106.
- Bieniawski, Z. T., 1984. The design process in rock engineering. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 17: 183-190.
- Bieniawski, Z.T., 1989. Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering. Interscience, John Wiley & Sons, New York, 272 p.
- Bieniawski, Z.T., 1993. Classification of rock masses for engineering: the RMR system and future trends. Hudson J.A., (ed.), *comprehensive rock engineering: principles, practice, and projects*. Pergamon Press, 33:553-574.
- Bock H., 2006. Common ground in engineering geology, soil mechanics and rock mechanics: past, present and future. *Bull. Eng. Geol. Env.*, 65:209-216.
- Brum Ferreira, A., 1978. Planaltos e montanhas do Norte da Beira: estudo de geomorfologia. *Memórias Centro Estudos Geográficos*, Lisboa, 4:1-374.
- Brum Ferreira, A., 1979. Os mantos de alteração e o modelado das regiões graníticas: ideias recentes e orientações de pesquisa. *Finisterra*, Lisboa, 14(28):218-244.
- Brum Ferreira, D., 1981. Carte géomorphologique du Portugal. *Memórias Centro Estudos Geográficos*, Lisboa, 6:1-54 (+ 2 mapas, escala 1/500000).
- Budetta, P., 2004. Assessment of rock fall risk along roads. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 4: 71–81.
- Cabral, J. & Ribeiro, A., 1988. Carta neotectónica de Portugal Continental, escala 1/1000000. *Serviços Geológicos de Portugal*, Lisboa.
- Cabral, J. & Ribeiro, A., 1989. Carta neotectónica de Portugal, escala 1/1000000. Nota explicativa. *Serviços Geológicos de Portugal*, Lisboa. 10 p.
- CFCFF – Committee on Fracture Characterization and Fluid Flow, 1996. *Rock fractures and fluid flow: contemporary understanding and applications*. National Research Council, National Academy Press, 568 p.
- Chaminé, H.I., 2016. Técnicas de amostragem em estudos de maciços rochosos fracturados: importância na prática da geologia estrutural, geociências de engenharia e mecânica das rochas. In: H.I. Chaminé, M.J. Afonso, A.C. Galiza (eds.), *Eduardo Gomes (1931-2008): Engenheiro, Docente, Empreendedor - Uma Homenagem*. Coleção LABCARGA-Geo|2, Laboratório de Cartografia e Geologia Aplicada & Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto. p. 297-343.
- Chaminé, H.I., Afonso M.J., Ramos L. & Pinheiro R., 2015. Scanline sampling techniques for rock engineering surveys: insights from intrinsic geologic variability and uncertainty. In: Giordan D., Thuro K., Carranza-Torres C., Wu F., Marinos P., Delgado C. (eds.), *Engineering Geology for Society and Territory – Applied Geology for Major Engineering Projects*, IAEG, Springer, 6:357-361.
- Chaminé, H.I., Afonso M.J., Teixeira J., Ramos L., Fonseca L., Pinheiro R. & Galiza A.C., 2013. Using engineering geosciences mapping and GIS-based tools for georesources management: lessons learned from rock quarrying. *European Geologist Journal*, 36:27-33.
- Chaminé, H.I., Afonso, M.J., Silva, R.S., Moreira, P.F., Teixeira, J., Trigo, J.F., Monteiro, R., Fernandes, P. & Pizarro, S., 2010a. Geotechnical factors affecting rock slope stability in Gaia riverside (NW Portugal). In: Williams A.L., Pinches G.M., Chin C.Y., McMorran T.J. & Massey C.I., eds., *Proceedings of the 11th Congress of the International Association for Engineering Geology*, IAEG'2010, Geologically Active, Auckland, New Zealand. CRC Press: Taylor & Francis Group. p. 2729-2736.

- 
- Chaminé, H.I., Afonso, M.J., Silva, R.S., Monteiro, R., Teixeira, J., Moreira, P., Meixedo, J.P. & Trigo, J.F., 2010b. Da teoria à prática em geotecnia urbana de maciços rochosos: o exemplo da zona ribeirinha de Gaia. *Tecnologia e Vida, Revista da Secção Regional do Norte da ANET, Porto*, volume 6, pp. 39-45.
- Chaminé, H.I. & Gaspar, A.F., 1995. Estudo da compartimentação de maciços rochosos pela técnica de amostragem linear: aplicação a uma travessa da Mina de carvão de Germunde. *Estudos, Notas & Trabalhos, Inst. Geol. Min.*, 37:97-111.
- Chaminé, H.I., Pinheiro, R., Meirinhos, J., Santa, C., Pereira, R., Silva, R.S., Moreira, P., Madureira, M.M., Martins, A., Fonseca, L., Ramos, L., 2016. Aplicativos informáticos para análise e avaliação de dados de campo em geociências de engenharia, geotecnia e hidrogeomecânica de maciços rochosos fracturados: MGC-RocDesign|Calc e GeoTech|CalcTools. In: H.I. Chaminé, M.J. Afonso, A.C. Galiza (eds.), Eduardo Gomes (1931-2008): Engenheiro, Docente, Empreendedor - Uma Homenagem. Coleção LABCARGA-Geo|2, Laboratório de Cartografia e Geologia Aplicada & Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto. p. 345 – 377.
- Conde, L.E.N., 1983. Mapa de fracturas de Portugal (Memória Descritiva). EDP. 118 p. + 4 mapas na escala 1/500000. (relatório inédito).
- Deere, D.U., Hendron A.J., Patton F.D., Cording E.J., 1967. Design of surface and near surface construction in rock. In: C. Fairhurst, (ed.), Failure and breakage of rock, proceeding 8th U. S. symposium rock mechanics. Soc. Min. Engrs, Am. Inst. Min. Metall. Petrol. Engrs., pp. 237-302.
- Deere D.U., 1963. Technical description of rock cores for engineering purposes. *Rock mechanics and engineering geology/ Felsmechanik und Ingenieurgeologie*, 1(1): 1-18.
- Dinis da Gama, C., 1991. Qualidade e patologia de obras geotécnicas. In: 4º Congresso Nacional de Geotecnia. Sociedade Portuguesa de Geotecnia, Lisboa, 3: 1-20.
- Dinis da Gama, C., 1995. Aspectos geotécnicos y de fracturación de las rocas ornamentales. In: López Jimeno, C. (ed.), Manual de Rocas Ornamentales. Entorno Gráfico S.L., Madrid, p. 231-246.
- Fahlstrom, P.G. & Gleason T.J., 2012. Introduction to UAV Systems. 4th edition, John Wiley & Sons Ltd, 332 p.
- Ferraz, P., 2016. Reforço e proteção de escarpas rochosas. Caso de estudo da escarpa de S. Cristovão. Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia do Porto. (dissertação de mestrado).
- Ferreira, N., Iglésias, M., Noronha, F., Pereira, E., Ribeiro, A. & Ribeiro, M.L. 1987. Granitóides da Zona Centro-Ibérica e seu Enquadramento Geodinâmico. In: Bea et al. (eds.) Geologia de los Granitóides e Rocas Asociadas del Macizo Hespérico. Ed Rueda, Madrid, p. 27-53.
- Fonseca, L., Ramos, L., Galiza, A.C. & Chaminé, H.I., 2010. Avaliação geomecânica de maciços rochosos fracturados e as tecnologias de perfuração: consequências técnico-económicas. In: Actas do 12º Congresso Nacional de geotecnia, SPG/UM, Guimarães, 10 p.
- Gao Y., Zhang Y., Jiang L. & Huang Z., 2011. Researches on index system of rock slope safety evaluation for open pit mine. *Procedia Engineering*, 26:1692-1697.
- Gonzalez de Vallejo L.I., Ferrer M., 2011. Geological engineering. CRC Press, Taylor-Francis group, 725 p.
- GSE [Geological Society Engineering Group Working Party Report], 1995. The description and classification of weathered rocks for engineering purposes. *Quarterly Journal of Engineering Geology, Geological Society*, 28(3):207-242.
- Hoek, E., Carter, T.G. & Diederichs, M.S., 2013. Quantification of the geological strength index chart. In: Proceedings geomechanics symposium 47th US rock mechanics, San Francisco, CA, ARMA 13-672, p. 1-8.
- Hoek E., Carranza-Torres C., Corkum B., 2002. Hoek-Brown failure criterion: 2002 edition. Proceedings of the NARMS-TAC Conference, Toronto, 1: 267-273.
- Hoek, E., Marinos, P. & Benissi, M., 1998. Applicability of the Geological Strength Index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses: the case of the Athens Schist Formation. *Bull. Eng. Geol. Env.*, 57(2):151-160.
- Hoek, E. & Bray, J.W., 1981. Rock slope engineering. Revised third edition. Inst. Mining and Metallurgy, London, 354 p.
- Hoek E., Brown E.T., 1980. Empirical strength criterion for rock masses. *J. Geotech. Eng., ASCE* 106 (GT9): 1013-1035.
- Hoek, E., 1994. Strength of rock and rock masses. *News Journal of ISRM*, 2(2): 4-16.
- Hoek, E., 2007. Practical rock engineering. RocScience: Hoek's Corner, 342 p.
- IAEG – International Association Engineering Geology, 1981a. Recommended symbols for engineering geological mapping. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 24: 227-234.
- IAEG – International Association Engineering Geology, 1981b. Rock and soil description and classification for engineering geological mapping. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 24: 235-274.
-

- 
- IGeoE - Instituto Geográfico do Exército, 1998. Carta Militar de Portugal, à escala 1/25.000, Série M888: folha 136 (Cinfães).
- IGP – Instituto Geográfico Português, 2010. Carta do uso e ocupação do solo de Portugal Continental para 2007 (COS2007). Memória descritiva, 87 p.
- INE – Instituto Nacional de Estatística, 2011. Informação estatística sobre a população portuguesa: Concelho de Cinfães. <http://www.ine.pt/> (consulta em Outubro de 2015)
- ISRM – International Society for Rock Mechanics, 1978. Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geom. Abstr.*, 15(6):319-368.
- ISRM – International Society for Rock Mechanics, 1981. Basic geotechnical description of rock masses. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geom. Abstr.*, 18:85-110.
- ISRM – International Society for Rock Mechanics, 1985. Suggested Method for determining Pont Load Strength. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geom. Abstr.*, 22:51-60.
- ISRM – International Society for Rock Mechanics, 2015. The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007–2014. In: Ulusay R., ed., suggested methods prepared by the commission on testing methods, ISRM. Springer, Cham, Heidelberg. 293 pp.
- ISRM – International Society for Rock Mechanics, 2007. The complete ISRM suggested methods for characterization, testing and monitoring: 1974-2006. In: Ulusay R. & Hudson J.A., eds., suggested methods prepared by the commission on testing methods, ISRM. Ankara, Turkey. 628 pp.
- Jordan, R.B., 2015. A bird's-eye view of geology: the use of micro drones/UAVs in geologic fieldwork and education. *GSA Today*, 25(7):50-52.
- Lamas, L.N., 1989. Estudo da compartimentação de maciços rochosos por uma técnica de amostragem linear e dos blocos formados pelas descontinuidades: aplicação a uma galeria do Alto Lindoso. In: Actas do 3º Congresso Nacional Geotecnia, Sociedade Portuguesa de Geotecnia, 3:C33-C44.
- Liu, Y.C. & Chen, C.S., 2007. A new approach for application of rock mass classification on rock slope stability assessment. *Engineering Geology*, 89: 129–43.
- Mello Mendes, F., 1967-68. Mecânica das rochas. Instituto Superior Técnico, Lisboa, 541 p.
- Moura Esteves, J., Coteló Neiva, J. & Oliveira, R., 1971. Alguns problemas de geologia e de engenharia: aproveitamento hidroeléctrico de Carrapatelo. In: Livro-guia da Excursão Nº6, I Congresso Hispano-Luso-Americano de Geologia Económica, Lisboa, p. 36-42.
- NEC & LABCARGA|ISEP, 2016. Projecto de Estabilização e Protecção da Escarpa Rochosa de S. Cristóvão. Relatório final para a Golder Associates Portugal Unipessoal, Lda. (Maio de 2016). Núcleo de Estudos da Construção (NEC) & Laboratório de Cartografia e Geologia Aplicada (LABCARGA), Instituto Superior de Engenharia do Porto. Porto, 75 p. + anexos (relatório confidencial).
- Oliveira, J.T., Pereira, E., Ramalho, M., Antunes, M.T. & Monteiro, J.H. (coords.), 1992. Carta Geológica de Portugal, escala 1/500000. 5ª edição, 2 folhas, Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.
- Palmström, A., Stille H., 2010. Rock engineering. Thomas Telford Ltd., 408 pp.
- Palmström, A., 2005. Measurements of and Correlations between Block Size and Rock Quality Designation (RQD). *Tunnels and Underground Space Technology*: 362-377.
- Palmström, A., 1975. Characterization of degree of jointing and rock mass quality. Intern. Report Ing. AB. Berdel, A.S. Oslo.
- Peel, M.C., Finlayson, B.L. & McMahon, T.A., 2007. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 11(5):1633-1644.
- Pereira, E., Ribeiro, A. & Meireles, C., 1993. Cisalhamentos hercínicos e controlo das mineralizações de Sn-W, Au, e U na Zona Centro Ibérica, em Portugal. *Cadernos Laboratório Xeológico de Laxe, A Coruña*, 18: 89-119.
- Pereira, E., Ribeiro, A., Carvalho, G.S., Noronha, F., Ferreira, N. & Monteiro, J.H., 1989. Carta Geológica de Portugal, escala 1/200000. Folha 1, Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.
- Pierson, L.A., Davis, S.A., Van Vickle, R., 1990. Rockfall hazard rating system implementation manual. In: Report FHWA-OR-EG-90-01. Federal Highway Administration, US Department of Transportation. 80 p.
- Pina L., 2008. Quantitative risk assessment of rock fall hazard in the Amalfi coastal road, Barcelona, Spain. Polytechnic University of Cataluña. 90 p. (MSc Thesis).
-

- 
- Pinheiro, M., Sanches, S., Miranda, T., Neves, A., Tinoco, J., Ferreira, A. & Correia, A.G., 2015. A new empirical system for rock slope stability analysis in exploitation stage. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 76:182–191.
- Pinheiro, M., Sanches, S., Miranda, T., Neves, A., Tinoco, J., Ferreira, A. & Correia, A.G., 2014. Sistema de avaliação de qualidade de taludes rochosos em fase de exploração. In: *Sociedade Portuguesa de Geotecnia, 14º Congresso Nacional de Geotecnia* [<http://hdl.handle.net/1822/31142>]
- Pinheiro, R., Ramos, L., Teixeira, J., Afonso, M.J. & Chaminé H.I., 2014. MGC–RocDesign|CALC: a geomechanical calculator tool for rock design. In: L.R. Alejano, A. Peruchó, C. Olalla & R. Jiménez (Eds.), *Proceedings of Eurock2014, Rock Engineering and Rock Mechanics: Structures in and on Rock Masses (ISRM European Regional Symposium, Vigo, Spain, 26-28 May 2014)*, CRC Press/Balkema Taylor & Francis Group, London, p. 655-660. (on pen-drive insert, ISRM Paper CH100).
- Priest, S.D., 1993. *Discontinuity analysis for rock engineering*. Chapman and Hall, London, 473 pp.
- Reid, T.R. & Harrison, J.P., 2000. A semiautomated methodology for discontinuity trace detection in digital images of rock mass exposures. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 37: 1073-1089.
- Ribeiro, A., Munhá, J., Dias, R., Mateus, A., Pereira, E., Ribeiro, L., Fonseca, P.E., Araújo, A., Oliveira, J.T., Romão, J., Chaminé, H.I., Coke, C. & Pedro, J., 2007. Geodynamic evolution of the SW Europe Variscides. *Tectonics*, 26(TC6009): 1-24.
- Ribeiro, O., Lautensach, H. & Daveau, S., 1987a. *Geografia de Portugal. Vol I – A posição geográfica e o território*. Edições João Sá da Costa, Lisboa, p. 3-34.
- Ribeiro, O., Lautensach, H. & Daveau, S., 1987b. *Geografia de Portugal. Vol II – O ritmo climático e a paisagem*. Edições João Sá da Costa, Lisboa, p. 336-623.
- Ribeiro, A., Conde, L. & Monteiro, J., 1972. *Carta tectónica de Portugal, escala 1:1000000*. Direcção Geral de Minas e Serviços Geológicos. Lisboa.
- Rocha M., 2013. *Mecânica das Rochas. Edição no âmbito das comemorações do centenário do nascimento do Engenheiro Manuel Rocha - 1913-2013*. LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 436 p.
- Romana, M., 1985. New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes. In: *International Symposium on the role of rock mechanics, ISRM*, p. 49-53.
- Romana, M., 1993. A geomechanics classification for slopes: slope mass rating. In: Hudson J. (ed.), *Comprehensive Rock Engineering, First Edition*. Pergamon, Oxford. 45p.
- Romana, M., 1997. El papel de las clasificaciones geomecánicas en el estudio de la estabilidad de taludes. In: Alonso et al. (eds.), *IV Simposio nacional sobre taludes y laderas inestables, Granada*, 3: 955-1011.
- Romana M., Serón J.B. & Montalar E., 2001. La clasificación geomecánica SMR: aplicación experiencias y validación. In: *Proceedings del V Simposio Nacional de Taludes y Laderas Inestables*. Madrid, p. 393-404.
- Romana M., Serón J.B., Montalar E., 2003. SMR geomechanics classification: application, experience and validation. In: *Proceedings ISRM 2003*, p. 1-4.
- Santa, C., Gonçalves, L. & Chaminé, H.I., 2016. Aplicação da classificação geomecânica GSI (versão 2013) em frentes de escavação de maciços rochosos heterogéneos (túnel do Marão, norte de Portugal). In: *Proceedings Congresso Nacional de Geotecnia, Porto*, 11 p.
- Simões Cortez, J.A., 2016. Da pressão dos terrenos à geomecânica: evolução do conhecimento dos maciços rochosos. In H.I. Chaminé, M.J. Afonso, A.C. Galiza (eds.), *Eduardo Gomes (1931-2008): Engenheiro, Docente, Empreendedor - Uma Homenagem. Colecção LABCARGA-Geo|2, Laboratório de Cartografia e Geologia Aplicada & Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto*. p. 285-295.
- Teixeira, C., 1973. Un barrage construit sur une grande faille. *Boletim da Sociedade Geológica de Portugal*, 18(II-III):137-141.
- Teixeira, C., Medeiros, A. C., Fernandes, A. P., 1968. *Carta Geológica de Portugal, escala 1/50000. Folha 14-A (Lamego)*, Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.
- Terzaghi, K. & Peck, R., 1987. *Soil mechanics in engineering practice*. John Wiley and Sons Inc., New York.
- Terzaghi, R.D., 1965. Sources of errors in joint surveys. *Geotéchnique*, 15(3): p. 287-304.
- Valayanis, K. & Vachtsevanos, G., 2015. *Handbook of unmanned aerial vehicles*. Springer, 3022 p.
- Vasconcelos, M.I., Ribeiro, J.M., Matos, E.S., 2000. *Geografia de Cinfães. Vol. IV. Câmara Municipal de Cinfães*. 63 p.

---

Vaz, T. & Zêzere J.L., 2016. Landslides and other geomorphologic and hydrologic effects induced by earthquakes in Portugal. *Natural Hazards*, 81:71-98.

Watkins, H., Bond, C.E., Healy, D., Robert & Butler, R.W.H., 2015. Appraisal of fracture sampling methods and a new workflow to characterise heterogeneous fracture networks at outcrop. *Journal Structural Geology*, 72:67-82.

Wyllie, D.C., 2014. *Rock fall engineering*. CRC Press, 270 p.

Wyllie, D.C. & Mah, C.W., 2004. *Rock slope engineering: civil and mining*. 4th Edition. Spon Press, London and New York, 431 p.

---

**Sítios da internet consultados (Dezembro de 2015 a Junho de 2017)**

<http://www.climate-data.org>

<http://www.ordemengenheiros.pt>

<https://electricideas.wordpress.com>

<http://picssr.com>

<http://cultura.culturamix.com>

<http://www.roscience.com>

<http://www.cm-cinfaes.pt>

<http://www.cm-cinfaes.pt/index.php/municipio-cat/item/683-transito-cortado-no-lugar-de-lavadouro>

<http://www.cm-cinfaes.pt/index.php/municipio-cat/item/692-cortado-transito-no-lugar-de-lavadouro-s-cristovao-de-nogueira>

<http://www.cm-cinfaes.pt/index.php/municipio-cat/item/867-mantem-se-cortado-o-transito-no-lugar-de-lavadouro-s-cristovao-de-nogueira>

<http://www.cm-cinfaes.pt/index.php/municipio-cat/item/1206-consolidacao-de-escarpas-de-lavadouro-a-concurso>

<http://www.cm-cinfaes.pt/index.php/municipio-cat/item/1490-reaberto-o-transito-no-lugar-de-lavadouro-s-cristovao-de-nogueira>

---

## **6. ANEXOS**

(Ver Cd–Rom)

***ANEXO I*** – Extrato da ficha de inspeção geral da Escarpa Rochosa de S. Cristóvão.

***ANEXO II*** – Extrato da ficha de inspeção geral de cada zona geotécnica da Escarpa Rochosa de S. Cristóvão.

***ANEXO III*** – Aplicação nas diversas zonas geotécnicas dos índices SQI e RHRSm2.